

Communication 38

MINERVE

Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan et de leurs effets

Frédéric Jordan
Javier García Hernández
Jérôme Dubois
Jean-Louis Boillat

- | | | |
|-------|------|--|
| N° 12 | 2002 | P. de Almeida Manso
Stability of linings by concrete elements for surface protection of overflow earthfill dams |
| N° 13 | 2002 | E. Bollaert
Transient water pressures in joints and formation of rock scour due to high-velocity jet impact |
| N° 14 | 2003 | D. S. Hersberger
Wall roughness effects on flow and scouring in curved channels with gravel bed |
| N° 15 | 2003 | Ch. Oehy
Effects of obstacles and jets on reservoir sedimentation due to turbidity currents |
| N° 16 | 2004 | J.-L. Boillat, P. de Souza
Hydraulic System - Modélisation des systèmes hydrauliques à écoulements transitoires en charge |
| N° 17 | 2004 | Cycle postgrade en aménagements hydrauliques
Collection des articles des travaux de diplôme postgrade |
| N° 18 | 2004 | S. Emami
Erosion protection downstream of diversion tunnels using concrete prisms - Design criteria based on a systematic physical model study |
| N° 19 | 2004 | Ph. Chèvre
Influence de la macro-rugosité d'un enrochement sur le charriage et l'érosion en courbe |
| N° 20 | 2004 | S. André
High velocity aerated flows on stepped chutes with macro-roughness elements |
| N° 21 | 2005 | Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la troisième correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues |
| N° 22 | 2005 | INTERREG IIIB - Projet ALPRESERV. Conférence sur la problématique de la sédimentation dans les réservoirs - Gestion durable des sédiments dans les réservoirs alpins |
| N° 23 | 2005 | Master of Advanced Studies (MAS) in hydraulic schemes
Collection des articles des travaux de diplôme |
| N° 24 | 2006 | S. Sayah
Efficiency of brushwood fences in shore protection against wind-wave induced erosion |
| N° 25 | 2006 | P. Manso
The influence of pool geometry and induced flow patterns in rock scour by high-velocity plunging jets |

Préface

Dès le VI^e siècle de notre ère, les inondations de la plaine du Rhône en amont du lac Léman ont périodiquement alimenté la chronique. Malgré deux importantes entreprises de correction du fleuve et en dépit des volumes de rétention offerts par les barrages à accumulation, les crues continuent à causer d'importants dégâts. Les dommages sont d'autant plus importants que l'utilisation agricole, l'urbanisation et le développement socio-économique du territoire se sont considérablement accrus au cours du temps. En outre, la période des fortes crues tend à reculer dans la saison, typiquement entre septembre et octobre, lorsque les retenues des aménagements à accumulation atteignent leur niveau maximum de remplissage.

En vue d'améliorer le niveau de protection de la plaine, des mesures structurales sont d'ores et déjà planifiées dans le cadre d'une nouvelle entreprise de correction. Parallèlement, une gestion adéquate des aménagements hydroélectriques à accumulation lors des événements extrêmes permettra de réduire significativement les pointes de crue sur l'ensemble du réseau hydrographique. Le projet MINERVE poursuit cet objectif en offrant un outil de simulation numérique du comportement hydrologique du bassin versant et du fonctionnement hydraulique des aménagements. Il est alimenté par les mesures des stations météorologiques d'une part et par les prévisions de MétéoSuisse d'autre part. Il est également doté d'un système expert d'aide à la décision qui propose des scénarios d'interventions préventives destinées à augmenter l'effet de laminage par les retenues.

Dans la présente communication, F. Jordan, J. García Hernández, J. Dubois et J-L. Boillat ont réuni les informations utiles à la compréhension des objectifs et du contenu du projet.

Le projet MINERVE est accompagné et financé par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG, actuellement OFEV) et par le Canton du Valais. Les prévisions hydrométéorologiques sont fournies gratuitement par MétéoSuisse en phase de développement du projet. Les propriétaires d'aménagements hydroélectriques contribuent à la fourniture de données historiques d'exploitation. Les développements scientifiques ont été confiés à deux unités de l'EPFL, le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) et le Laboratoire Hydrologie et Aménagements (HYDRAM, actuel ECHO)

Prof. Dr Anton Schleiss

Vorwort

Seit dem 6. Jahrhundert sind regelmässige Überflutungen der Rhone oberhalb des Genfersees überliefert. Zwei bedeutende Korrekturen der Rhone sowie die Schaffung von Rückhaltevolumen durch Stauanlagen veränderten wenig an dieser Tatsache. Vielmehr haben die Schäden im Laufe der Zeit aufgrund intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und Urbanisierung der Ebene sowie infolge sozio-ökonomischer Entwicklung beträchtlich zugenommen. Darüber hinaus scheinen die typischerweise im September und Oktober auftretenden Starkregenperioden in die Zeit zu fallen, in der die Speicher in den Seitentälern bereits nahezu gefüllt sind.

Im Rahmen der 3. Rhonekorrektur sind wasserbauliche Massnahmen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes geplant. Parallel dazu ermöglicht ein angepasster Betrieb der Speicherkraftwerke während Extremereignissen eine signifikante Reduktion der Hochwasserspitzen. Im Rahmen des Projektes MINERVE wird ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, welches das hydrologische Verhalten des Einzugsgebietes und den Betrieb der Speicherkraftwerke berücksichtigt. Das Modell benutzt zum einen die Daten der meteorologischen Stationen und zum anderen die Vorhersagen von MeteoSchweiz. Darüber hinaus ist es mit einem Expertensystem zur Entscheidungsfindung ausgestattet, welches die Simulation verschiedenster präventiver Szenarien zur Reduktion der Hochwasserspitzen mittels Rückhalt in den Speichern erlaubt.

Die vorliegende Mitteilung von F. Jordan, J. García Hernández, J. Dubois et J-L. Boillat beschreibt die Ziele und Ergebnisse des Projektes MINERVE.

Das Projekt MINERVE wurde vom ehemaligen Bundesamt für Wasser und Geologie (BWG, heute BAFU) und dem Kanton Wallis begleitet und finanziert. Die hydrometeorologischen Vorhersagen wurden von MeteoSchweiz in der Entwicklungsphase zur Verfügung gestellt. Die Betreiber der Stauanlagen haben die historischen Betriebsdaten geliefert. Die hydrologischen Projektgrundlagen wurden in Zusammenarbeit mit dem Laboratoire Hydrologie et Aménagements (HYDRAM, heute ECHO) der EPFL erarbeitet.

Prof. Dr Anton Schleiss

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	5
L'EVOLUTION HISTORIQUE DU RHONE ALPIN	5
<i>La situation avant 1860</i>	5
<i>La première correction du Rhône (1863-1894)</i>	6
<i>La deuxième correction du Rhône (1928-1958)</i>	7
<i>Les barrages valaisans</i>	9
<i>La situation actuelle et le projet de troisième correction du Rhône</i>	10
L'INFLUENCE DES AMENAGEMENTS HYDROELECTRIQUES SUR LES CRUES	11
<i>La simulation des crues</i>	12
<i>La crue d'octobre 2000</i>	14
LE PROJET MINERVE	16
<i>Les partenaires du projet</i>	16
<i>Les objectifs et l'organisation du projet</i>	17
<i>Les axes de développement</i>	18
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	19
MODELISATION HYDROLOGIQUE	21
CONCEPT DE MODELISATION	21
<i>Modélisation semi-distribuée</i>	21
<i>Découpage hydrologique</i>	22
<i>Modèle de fonte de neige</i>	24
<i>Modèle de fonte glaciaire</i>	25
<i>Modèle d'infiltration-ruissellement</i>	26
<i>Routage dans les cours d'eau</i>	27
LE LOGICIEL ROUTING SYSTEM II	28
INTRODUCTION	29
INTERFACE UTILISATEUR	29
<i>Menu</i>	29
<i>Barre des outils</i>	31
<i>Palette d'objets</i>	32
<i>Base de données</i>	32
CONCEPT DE MODÉLISATION ET OBJETS	34
<i>Concept de modélisation</i>	34
<i>Principaux objets</i>	34
TRAITEMENT ET RESULTATS	40
<i>Démarrage de Routing System II</i>	40
<i>Construction du modèle hydrologique</i>	40
<i>Démarrage d'une simulation numérique</i>	41
<i>Visualisation des résultats</i>	45

LE MODELE NUMERIQUE MINERVE	46
DESCRIPTION DU MODELE NUMERIQUE MINERVE	47
<i>Données structurelles et fonctionnelles des aménagements hydroélectriques</i>	47
<i>Discrétisation du bassin versant</i>	48
<i>Paramètres géomorphologiques</i>	49
<i>Topologie du modèle et nomenclature</i>	49
<i>Construction du modèle dans Routing System II</i>	51
CALAGE ET VALIDATION DU MODELE HYDROLOGIQUE	54
<i>Paramètres de calage</i>	54
<i>Données de commande et de contrôle</i>	56
<i>Paramétrage de la production hydroélectrique</i>	57
<i>Procédure de calage</i>	59
PERFORMANCE DU CALAGE ET DE LA VALIDATION	59
<i>Sous-bassins versants non aménagés</i>	60
<i>Sous-bassins versants aménagés</i>	62
COMMENTAIRES	65
PREVISION HYDROLOGIQUE	66
DONNEES BRUTES METEOSUISSE	67
SPATIALISATION AUX STATIONS VIRTUELLES MINERVE	68
<i>Précipitations</i>	69
<i>Température</i>	70
MISE A JOUR DU MODELE HYDROLOGIQUE	71
<i>Provenance des incertitudes et stratégies de correction</i>	72
<i>Algorithme de filtrage des variables d'état du modèle hydrologique</i>	74
<i>Illustration du fonctionnement de l'algorithme de filtrage</i>	76
<i>Simulations avec mise à jour du modèle hydrologique</i>	80
PREVISION HYDROLOGIQUE EN PERIODE DE CRUE	85
<i>Simulation continue avec Routing System II</i>	85
<i>Simulation Routing System II avec mise à jour automatique du modèle</i>	85
<i>Choix de la prévision hydrologique</i>	86
LE MODELE D'AIDE A LA DECISION	88
CONCEPT DU MODELE D'AIDE A LA DECISION	88
ESTIMATION DES HYDROGRAMMES A L'AVANT DES AMENAGEMENTS	
HYDROELECTRIQUES	89
<i>Données nécessaires</i>	89
<i>Méthode de calcul</i>	89
VERSION OPERATIONNELLE DU PROGRAMME D'OPTIMISATION	91
<i>Présentation de l'outil</i>	91
<i>Objectifs et points de contrôle</i>	91
<i>Fonctions de coût</i>	92
VALIDATION DE LA METHODE D'OPTIMISATION	94
<i>Procédure de validation</i>	94
<i>Crue de septembre 1993</i>	94
<i>Crue d'octobre 2000</i>	96

PERFORMANCE DU SYSTEME	98
CONCEPT DE FONCTIONNEMENT DE MINERVE	99
<i>Fonctionnement du système à haut niveau</i>	99
<i>Fonctionnement du modèle de prévision hydrologique</i>	100
<i>Fonctionnement du modèle d'optimisation</i>	101
<i>Technologies utilisées</i>	102
PERFORMANCE THEORIQUE DU SYSTEME LORS DE SCENARIOS DE CRUE	103
<i>Crue de septembre 1993</i>	103
<i>Crue d'octobre 2000</i>	104
RECOMMANDATIONS EN SITUATION DE CRISE	106
BIBLIOGRAPHIE	109

Chapitre 1

Introduction générale

L'évolution historique du Rhône alpin

Le Rhône alpin prend sa source à 2000 m d'altitude, au pied du glacier qui porte son nom, et s'écoule jusqu'au lac Léman dont le niveau moyen est régulé à 372.30 m s.m. Son régime nivo-glaciaire est caractérisé par des fortes crues durant la période été-automne, qui génèrent une relation parfois conflictuelle avec les habitants de la plaine.

La situation avant 1860

Des témoignages datant du VI^e siècle relatent déjà des inondations dommageables aux moissons. L'exploitation agricole de la plaine était particulièrement difficile en raison des sauts d'humeurs du fleuve. Une grande partie des terres était de nature marécageuse, des surfaces importantes étaient régulièrement recouvertes par des alluvions. En 1883, l'écrivain Charles Lenthéric (1883) compare la plaine rhodanique à une « steppe de la Camargue provençale ». Il décrit un milieu présentant de grandes richesses au niveau biologique, avec une faune et une flore très diversifiées. La formation d'îlots pâturables dont l'étendue varie à chaque crue ainsi que l'apparition de dunes créées par le vent contribuent à la richesse du paysage. Sous l'effet du vent, les sables fins déposés lors des crues s'amassent en forme de collines ondulées atteignant 15 à 20 m, colonisées de pains nains, de chênes et de genévriers.

Jusqu'à la fin du 19^e siècle, les ouvrages de protection contre les débordements du fleuve étaient presque toujours réalisés de manière isolée, sans coordination, par les particuliers, consortages ou communes. Les premiers timides essais d'endiguement apparaissant dans les archives cantonales datent de 1532. Le but principal était de sauvegarder tant bien que mal les cultures, les habitations se situant généralement sur les flancs de la vallée ou sur les cônes de déjection des affluents. Les ouvrages de l'époque consistaient en un rehaussement des berges par de la terre et du gravier, le tout consolidé par des troncs d'arbres et des fascines. Ces structures étaient parfois disposées de manière offensive, sous forme d'épis obliques par

rapport au courant, rejetant ainsi les eaux contre la berge opposée rendue plus vulnérable.

En 1602, la première disposition concernant le Rhône fixait la largeur du lit à 185 mètres. Cette largeur fut réduite de moitié 150 ans plus tard, suite à l'apparition de bancs de gravier. Les premiers aménagements se faisaient de manière disparate sans organisation globale, ni plan d'ensemble. Au début du 19^e siècle, les autorités cantonales et communales décidèrent d'établir un plan d'ensemble dans le but de coordonner les travaux. Afin de rectifier le cours du fleuve, certaines communes furent autorisées à établir des digues offensives alors que celles se trouvant sur la rive opposée n'étaient habilitées qu'à défendre leurs berges. En 1833, le parlement régional adopta une loi sur l'endiguement du Rhône, des rivières, des torrents ainsi que l'assèchement des marais. Il interdisait notamment la réalisation de digues offensives et favorisait la mise en culture de la plaine.

La première correction du Rhône (1863-1894)

Les hautes eaux du 1^{er} au 3 septembre 1860 furent à ce point dévastatrices qu'elles développèrent une prise de conscience collective sur la nécessité de réaliser des aménagements sur le lit du Rhône. Les travaux de la première correction se déroulèrent entre 1863 et 1894. Le projet consistait en la réalisation de deux digues parallèles insubmersibles renforcées par des épis opposés et perpendiculaires à l'axe du fleuve.

Suite à l'examen du projet par des experts, à la fin de l'année 1863, l'Assemblée fédérale décida d'octroyer un subside fédéral au canton du Valais. Cette contribution se montait à un tiers des frais engagés.

Les travaux de correction ne furent pas uniformes sur tout le tracé du fleuve. Selon leurs caractéristiques morphologiques, certaines parties du lit ne subirent que peu de modifications. La correction du Rhône s'est concentrée en aval de l'embouchure de la Massa sur une distance de 120 km. Jusqu'à Sion, le Rhône fut doté presque partout d'un nouveau lit (Fig. 1.1) et il subit d'importantes interventions en aval jusqu'au Léman. L'essentiel du projet portait sur la partie du fleuve située en amont de St-Maurice.



Figure 1.1 : Le lit du Rhône à Sion. En haut, avant la 1^{ère} correction (carte Dufour de 1848). En bas, le tracé actuel après la 2^{ème} correction

La deuxième correction du Rhône (1928-1958)

Les travaux de la première correction du Rhône fixèrent précisément le cours du fleuve et permirent d'intensifier la mise en culture de la plaine. Cependant de nouvelles inondations se produisirent à plusieurs reprises après ces travaux, causant à nouveau d'importants dégâts.

L'insuffisance des ouvrages avait trois causes principales :

- L'exhaussement du lit était observé sur certains tronçons, en particulier au centre du Valais, entre Chippis et Dorénaz.
- Plusieurs ruptures de digues étaient survenues sans que le couronnement des digues eût été atteint par les hautes eaux. Les matériaux sableux utilisés autrefois n'offraient pas l'étanchéité et la stabilité nécessaires.
- Les nouvelles crues survenues atteignaient des débits de pointe plus élevés que ceux adoptés pour le dimensionnement du chenal.

La menace que représentait le Rhône n'était ainsi pas résolue, d'autant plus que la 1^{ère} correction avait permis la densification de l'occupation de la plaine, augmentant le potentiel des dommages en cas de nouvelle inondation. Suite aux crues extraordinaires de 1920,

ce bilan négatif ne pouvait plus être ignoré. Il s'agissait donc de poursuivre les travaux de correction avec comme priorités de résoudre l'exhaussement du lit, d'assurer des digues fiables et une capacité hydraulique suffisante en cas de hautes eaux.

Il fut décidé de maintenir le profil double en limitant le lit mineur sur toute sa longueur par deux digues parallèles submersibles. La disposition offensive des épis était éliminée et le lit recevait un profil plus constant et plus régulier, offrant moins d'obstacles à l'écoulement et facilitant l'entraînement des alluvions. Les travaux consistèrent à draguer le lit et à déposer les matériaux entre les épis pour former un glaciais incliné vers le Rhône et sur les digues pour les exhausser.

Des essais de validation de ce nouveau concept se révélèrent concluants et le Département des travaux publics présenta, le 23 avril 1934, au Département fédéral de l'intérieur un projet de deuxième correction du Rhône. Début 1935, toutes les dispositions étaient prises pour entamer les travaux mais au mois de juin, sous la sollicitation de forts débits continus, les matériaux limoneux utilisés en phase expérimentale n'eurent pas la force de résister et s'écroulèrent. Le choix se porta définitivement sur les matériaux dragués dans le fleuve pour la réalisation des digues.

De manière surprenante, un nouvel exhaussement fut remarqué entre 1938 à 1950 à certains endroits. Par contre dès les années 50 cette tendance s'arrêtait et le lit du Rhône entraînait dans une phase d'érosion sur de nombreux tronçons, déstabilisant les fondations d'ouvrages existants. Il est reconnu aujourd'hui que ce sont les intenses extractions des gravières et la diminution des apports solides des affluents par l'effet des barrages qui sont les principales causes de ce renversement de tendance. Sans cela, l'exhaussement du lit aurait théoriquement continué au rythme d'environ 1 à 2 cm par année.

Les observations révélèrent également que les digues construites faisaient obstacle à l'évacuation des eaux provenant des coteaux et de la plaine. L'état marécageux de cette dernière ne provenait pas des infiltrations du Rhône, dont les limons transportés colmatent le lit, mais de la stagnation des eaux. La construction de canaux d'assainissement a été le complément nécessaire pour l'assainissement de la plaine.

L'endiguement du Rhône n'a cependant pas résolu complètement le problème de la sécurité (Bianco et al. 1999). L'espace disponible pour le cours d'eau est aujourd'hui réduit à un couloir étroit entre deux digues surélevées de 3 à 4 m par rapport au niveau de la plaine. Ainsi même si les crues de 1987 et 1993 n'entraînèrent pas d'inondations aussi importantes que par le passé, elles révélèrent le mauvais état de certaines digues et la nécessité d'effectuer de nouveaux travaux pour assurer la sécurité.

Les barrages valaisans

La construction des aménagements hydroélectriques en Valais (Fig. 1.2) a commencé en 1893 avec une centrale à Zermatt sur le Triftbach. Jusqu'en 1950, l'utilisation de l'eau pour la production d'électricité n'évolua pas beaucoup. Seules les centrales de Chippis „Navisence“, Fully, Vernayaz, Chandoline et Miéville furent mises en service pour un débit équipé total inférieur à $50 \text{ m}^3/\text{s}$. La quasi totalité des grandes centrales actuelles, Riddes, Ackersand, Nendaz, Stalden, Bitsch1, La Bâtiaz, Steg, Bitsch2, ont été réalisées entre 1950 et 1980. La capacité de turbinage installée se montait alors à $275 \text{ m}^3/\text{s}$. Avec, la mise en service de l'Usine de Bieudron en 1998, d'une capacité de $75 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit total turbinable se monte à $350 \text{ m}^3/\text{s}$. Il convient de mentionner que ce dernier aménagement est provisoirement hors service, suite à la rupture du puits blindé survenue le 12.12.2000. Les travaux de réhabilitation sont en cours.

Il est intéressant de constater que le débit installé des aménagements hydroélectriques à accumulation est nettement supérieur au débit annuel moyen actuel du Rhône à la porte du Scex qui est de l'ordre de $180 \text{ m}^3/\text{s}$. En comparaison des valeurs considérées à Branson pour le dimensionnement de la troisième correction du Rhône, env. $1260 \text{ m}^3/\text{s}$, et au débit extrême d'une crue millénale, évalué à $1600 \text{ m}^3/\text{s}$, cette capacité de turbinage de $275 \text{ m}^3/\text{s}$ ($350 \text{ m}^3/\text{s}$ avec Bieudron), n'est de loin pas négligeable.

Jusqu'en 1950, le volume utile des retenues valaisannes demeurait relativement modeste, de l'ordre de 97 Mio m^3 . Entre 1950 et 1980, avec la réalisation des grands aménagements, le volume utile total passait à 1157 Mio m^3 puis, avec la surélévation du barrage de Mauvoisin en 1991, à 1195 Mio m^3 . Cela représente 21% du volume transitant annuellement à la Porte du Scex. Il est ainsi évident que la capacité totale de turbinage actuelle de $275 \text{ m}^3/\text{s}$ ($350 \text{ m}^3/\text{s}$ avec Bieudron) et le volume de rétention de $1'200 \text{ Mio m}^3$ peuvent influencer de manière significative le régime du Rhône, en particulier en situation de crue (Biederman et al 1996). Il est aussi intéressant de remarquer qu'en incluant les centrales au fil de l'eau sur le Rhône (La Souste et Lavey), 85% du débit du Rhône est turbiné au moins une fois.

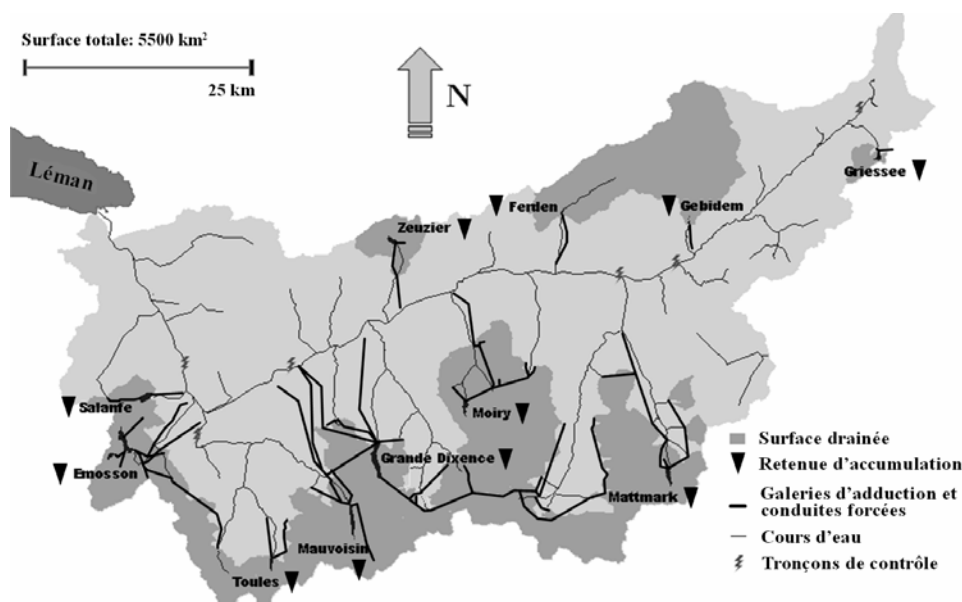


Figure 1.2 : Les principaux éléments du réseau de captage et de rétention des aménagements à accumulation et d'évacuation des eaux en Valais

La situation actuelle et le projet de troisième correction du Rhône

L'endiguement du Rhône a permis de gagner 17'000 ha de terre. Autrefois inculte la plaine du Rhône est aujourd'hui très prospère et les marécages ont fait place à un territoire fertile. L'endiguement opéré par la première et la deuxième correction du Rhône n'a cependant pas résolu complètement le problème de la sécurité. La majeure partie du Rhône est canalisée dans un double lit composé d'un lit mineur d'environ 40 mètres de largeur et d'un lit majeur capable d'accueillir un volume d'eau important en cas de crue. Seules la région du bois de Finges à Sierre, classée zone alluviale d'importance nationale, et la source du Rhône sont préservées de toutes atteintes.

Ainsi, même si les crues de 1987 et 1993 n'entraînèrent pas d'inondations aussi importantes que par le passé, les dommages occasionnés s'en trouvaient considérablement accrus en raison de la valeur des biens menacés. Ces crues révélèrent en particulier le mauvais état de certaines digues et la nécessité d'effectuer de nouveaux travaux pour assurer la sécurité.

Il est également intéressant de remarquer que les inondation qui, à partir de la fin du XIXe siècle, se produisaient généralement entre la fin juillet et la mi septembre développent une tendance à survenir plus tard dans la saison, typiquement entre septembre et octobre. Ce décalage temporel déplace les crues vers la période où les retenues saisonnières des grands aménagements atteignent leur niveau maximal de remplissage. La capacité de rétention favorable au laminage des crues s'en trouve ainsi fortement réduite.

Face à cette situation, le canton du Valais a initié dès 1995 le projet d'une troisième correction du Rhône, avec les objectifs de garantir la sécurité contre les crues et de rétablir ou de renforcer les fonctions biologiques et socio-économiques que le fleuve doit assurer. Parmi les grands principes du projet (Arborino, 2000) il est prévu d'optimiser la rétention à l'amont pour ne pas aggraver la situation à l'aval. Dans les cas rares à extrêmes, cette rétention peut se réaliser dans la plaine en inondant les secteurs dont le potentiel de dommage est peu élevé. Cet effet de rétention, s'ajoute à celui produit par les retenues des aménagements hydroélectriques qu'il s'agit de privilégier et dont l'efficacité peut être augmentée grâce à une gestion préventive de leur exploitation.

Cette rétrospective historique de l'évolution du Rhône alpin montre que, outre les modifications morphologiques apportées dans l'optique de la protection contre les crues, le régime hydrologique a subi des modifications importantes sous l'effet de la construction des retenues des aménagements hydroélectriques et vraisemblablement sous l'effet de modifications climatiques dont l'évolution en cours n'est pas prévisible.

L'influence des aménagements hydroélectriques sur les crues

En l'espace de 13 ans, quatre épisodes de crues importantes ont été observés (1987, 1993, 1994, 2000) sur le bassin versant du Rhône alpin en amont du lac Léman. En 1993, des inondations catastrophiques se produisaient dans la région du Haut-Valais, en Ville de Brigue en particulier. En 2000, la région du Bas-Valais était également touchée. Suite à l'événement de 1993, le canton du Valais a mis sur pied le groupe de travail CONSECRU (CONcept de Sécurité contre les risques liés aux CRUes) chargé d'établir un plan visant à atténuer les conséquences négatives des crues. Dans le rapport final d'avril 2001, des propositions ont été faites concernant la suppression/diminution du danger et la planification de mesures d'urgence.

Dans ce cadre, la contribution potentielle des aménagements hydroélectriques à accumulation a été analysée. La nécessité d'un modèle d'ensemble du système hydraulique est rapidement apparue, incluant aussi bien les bassins versants et le réseau hydrographique que les aménagements hydroélectriques. Cette modélisation devait permettre, dans un premier temps, de mettre en évidence l'effet des retenues valaisannes sur les crues du Rhône et de ses affluents et de quantifier le potentiel de protection offert par les aménagements en situation de crue. Le Conseil d'Etat valaisan a ainsi décidé, en séance du 13 octobre 1999, de lancer une première phase d'étude pour la

modélisation des effets des barrages valaisans sur les crues du Rhône et de ses principaux affluents.

La simulation des crues

Le modèle de simulation développé dans l'étude de faisabilité concernait le bassin versant du Rhône jusqu'à Branson, sur lequel un découpage en 83 sous-bassins versants autorisait la production et le transfert des hydrogrammes de crues résultant des précipitations. L'utilisation d'un modèle de génération stochastique a également permis de constituer une base de données regroupant plus de 7000 averses associées à des conditions limites telles que l'altitude de l'isotherme zéro degré et les débits spécifiques glaciaires. La modélisation numérique du transfert pluie-débit a été effectuée à l'aide du logiciel Routing System (Dubois et Boillat, 2000). Elle prend en compte la distribution spatio-temporelle des précipitations, les caractéristiques des différents bassins versants, le routage dans les cours d'eau, les captages, la rétention dans les retenues, l'exploitation des centrales hydroélectriques et des stations de pompage.

Le but premier de cette étude était de mettre en évidence l'effet des aménagements hydroélectriques sur les crues importantes. Le modèle développé permet de répondre à cette question en activant ou non la présence des ouvrages hydrauliques. La comparaison des résultats avec et sans aménagements a ainsi pu être obtenue en tout point du modèle (Dubois et al., 2000 ; Raboud et al., 2001). Les exemples de résultats présentés à la figure 1.3 illustrent bien l'effet de laminage produit par les retenues. Pour la crue considérée, le débit de pointe subit une réduction de 11.6% à Branson, situé à l'exutoire de la zone d'étude. Sur la Viège à Viège, le débit de pointe diminue de 51.8%, sous l'effet de la retenue de Mattmark et des nombreux captages destinés à Grande Dixence. Ces résultats illustrent bien l'effet protecteur des aménagements hydrauliques.

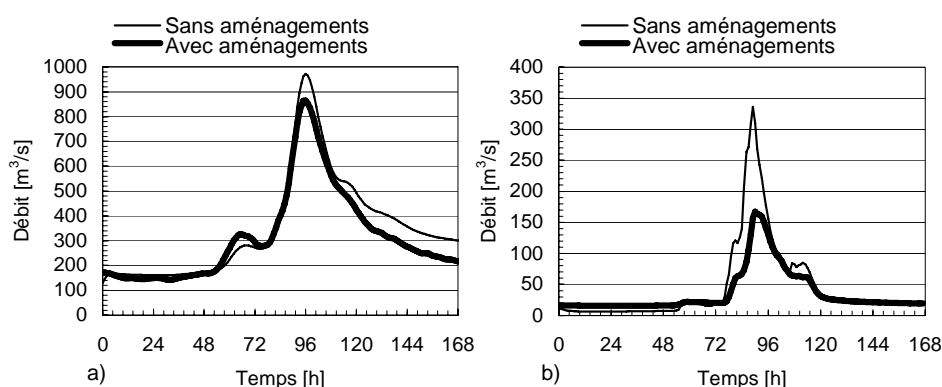


Figure 1.3 : Hydrogrammes simulés avec et sans la présence des aménagements hydroélectriques. a) Branson, b) Viège

Le modèle de simulation a ensuite été utilisé pour établir la probabilité d'apparition de certains débits. A l'aide du générateur stochastique de pluie, 30 séries de pluies continues de 120 ans chacune ont été produites puis introduites dans le modèle. Sur l'ensemble des crues ainsi générées, seules celles dont le débit de pointe à Branson se situait entre 1020 et 1600 m³/s ont été retenues. D'un point de vue statistique, ces valeurs correspondent aux quantiles 10% et 90 % du débit centennal à cet endroit. Cette démarche a conduit à la sélection de 459 crues qui ont ensuite permis une étude de sensibilité sur le niveau initial dans les retenues et la gestion du turbinage lors des crues.

Le taux initial de remplissage de l'ensemble des retenues a été varié entre 92% et 100%, sachant que la valeur moyenne observée durant les 15 dernières années se situe aux environs de 94% en période de fortes crues. Le taux d'enclenchement du turbinage a lui été varié entre 92 et 96%. Toutes les turbines étaient enclenchées lorsque le remplissage des retenues atteignait 99%. Dans ce domaine d'exploration, la réduction des débits de pointe due aux aménagements a été calculée pour les 459 crues sélectionnées.

Il ressort des résultats présentés sur la figure 1.4 que le taux d'enclenchement du turbinage préventif n'a que peu d'influence sur les débits de pointe. Ce résultat n'est pas vraiment surprenant dans la mesure où la stratégie de turbinage adoptée ne poursuit d'autre objectif que d'éviter ou de réduire le débit de pointe déversé par les organes de sécurité du barrage, sans toutefois interrompre le turbinage pendant la pointe de crue. Une stratégie de vidange préventive produira certainement un meilleur résultat. Cette hypothèse a pu être confirmée dans la suite du projet MINERVE. Par contre, le taux initial de remplissage des retenues produit un effet plus marqué, aux deux emplacements considérés. Il apparaît surtout que la prise en compte des aménagements hydrauliques est incontournable pour la simulation de situations de crue. En effet, même si toutes les retenues sont

initialement pleines et que le turbinage ne fonctionne pas, une réduction significative du débit de pointe est toujours observée.

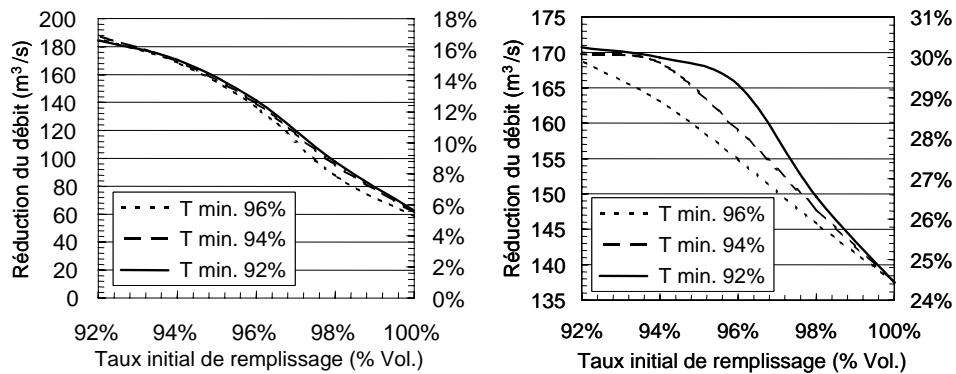


Figure 1.4: Etude de sensibilité du taux initial de remplissage des retenues et du taux d'enclenchement Tmin du turbinage. à gauche) Branson, à droite) Viège

La crue d'octobre 2000

En octobre 2000, le canton du Valais et en partie le canton du Tessin, ont été victimes de graves catastrophes dues aux crues (OFEG, 2002). Le triste bilan fait état de 16 morts. Un tiers du village valaisan de Gondo a été détruit par les eaux et les éboulis. L'étendue des destructions a été d'une telle ampleur (Fig. 1.5) qu'il en résulte des dommages évalués à 670 millions de francs.

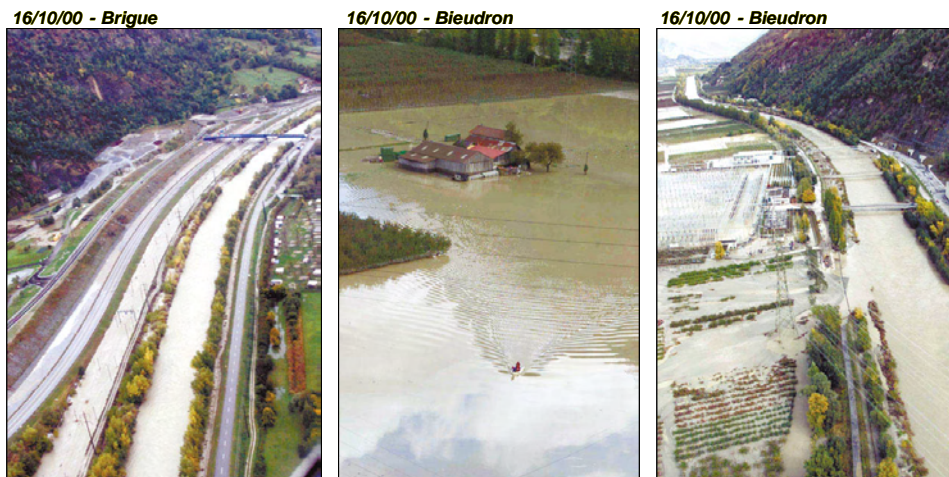


Figure 1.5: Images de la crue du Rhône d'octobre 2000 en Valais

Afin de quantifier l'influence des aménagements hydroélectriques sur la crue du Rhône d'octobre 2000, le modèle numérique a été calé sur les valeurs de débit mesurées aux stations limnimétriques du Rhône

puis utilisé pour simuler une situation fictive ignorant la présence des aménagements hydroélectriques (Boillat et Jaberg, 2001 ; Boillat et al., 2002a). Les résultats obtenus permettent non seulement d'évaluer les volumes d'eau captés pendant la crue mais aussi d'apprécier le laminage produit par les barrages.

Les hydrogrammes calculés à Brigue et à Branson, avec et sans les aménagements hydroélectriques sont présentés sur la figure 1.6 à titre d'exemple. A ces deux stations, considérées comme représentatives des tronçons amont et aval du Rhône alpin, la réduction du débit de pointe est respectivement de 85 m³/s et 140 m³/s. Cette dernière valeur correspond à une différence de niveau du Rhône de l'ordre de 75 cm à Branson. Il suffit de se remémorer les limites atteintes par le passage de la crue pour apprécier à sa juste valeur l'effet bénéfique produit par les barrages valaisans à cette occasion.

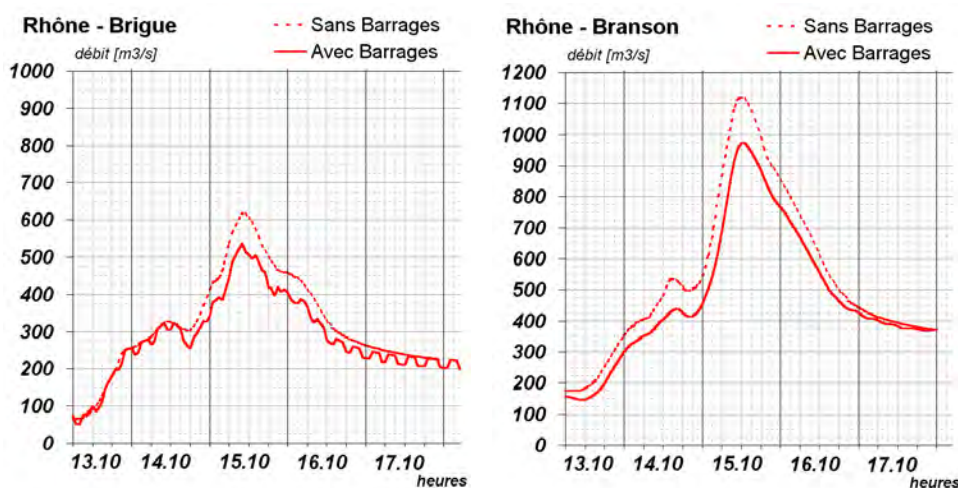


Figure 1.6: Hydrogrammes modélisés de la crue d'octobre 2000, aux stations limnimétriques du Rhône à Brigue et Branson, avec et sans la présence des barrages

Ce dernier constat débouche tout naturellement sur l'intérêt de pouvoir utiliser les aménagements hydroélectriques dans un but de protection contre les crues. Il ne faut pas oublier cependant que leur fonction prioritaire et actuellement unique est la production d'électricité et qu'ils sont exploités selon un cycle d'accumulation caractérisé par des réservoirs pleins vers la fin de l'été (septembre-octobre), précisément à la saison des fortes crues. Malgré ces intérêts antinomiques, il n'est pas utopique de penser qu'une gestion intelligente des aménagements est susceptible d'augmenter sensiblement leur effet de laminage en période de crue, sans préteriter pour autant la production énergétique.

Des pluies extrêmes de longue durée, telles que celles tombées entre le 10 et le 16 octobre 2000 sur le sud des Alpes du Piémont au Tessin, avec des précipitations centrées sur la région du col du Simplon, sont à l'origine de laves torrentielles et de glissements de terrain qui ont aggravé l'ampleur des dégâts dus aux crues elles-mêmes. Les volumes

de précipitations étaient tels qu'ils auraient pu avoir des conséquences bien plus désastreuses encore. Grâce essentiellement aux mesures d'urgence qui ont été prises par le canton du Valais suite aux intempéries de 1993, une catastrophe de plus grande ampleur a pu être évitée.

La gestion de crise pratiquée en telle circonstance montre que, seules des actions concertées entre toutes les parties concernées permettent de limiter les dégâts à un niveau acceptable. Il est ainsi établi qu'avec un bon concept de prévisions, des mesures efficaces de protection contre les crues peuvent être prises. Même si la protection absolue ne peut être garantie, une bonne connaissance des phénomènes hydrologiques et hydrauliques basés sur la prévision météorologique facilite la gestion du risque résiduel. C'est le défi qu'il s'agit de relever en matière de protection contre les crues.

Le projet MINERVE

A la fin de la phase préliminaire du projet de simulation des crues en Valais, le canton dispose d'un modèle numérique capable de modéliser les écoulements dans les réseaux hydrographiques naturels et aménagés, à partir de la connaissance des pluies et des consignes d'exploitation des aménagements. Ce modèle se révèle comme un outil performant pour le couplage hydrologique et hydraulique dans la simulation de systèmes complexes. L'intérêt, l'efficacité et la précision de ce modèle devaient toutefois être améliorés par l'intégration combinée de données mesurées (précipitations, débits, températures, etc.) et de prévisions météorologiques. Pour ce faire, il devait être adapté de manière à suivre l'évolution des crues en temps réel et à suggérer la gestion des aménagements la plus adéquate.

Les partenaires du projet

Le projet MINERVE, actuellement en phase de développement (Boillat et al., 2002b; Jordan et al., 2004), est élaboré en partenariat par les institutions suivantes :

- le Département des transports, de l'équipement et de l'environnement, par son Service des Routes et Cours d'Eau (SRCE) et le Département de la santé, des affaires sociales et de l'énergie, par son Service des Forces Hydrauliques (SFH) sont les représentants du maître de l'ouvrage. En qualité de futurs utilisateurs, Ils ont la compétence d'orienter l'avancement des différents axes de développement du projet ;
- l'Office fédéral de eaux et de la géologie (OFEG) intervient comme organe de supervision et comme fournisseur de données hydrométriques par le réseau fédéral des stations limnimétriques; son

rôle est aussi de subventionner le projet et d'apporter ses compétences techniques et son expérience issue notamment des prévisions du Rhin alpin ;

- MétéoSuisse est l'organisme qui gère les stations climatiques automatiques des réseaux ANETZ et ENET ainsi que les stations radar (Albis, Dôle, Monte Lema). Cette institution est principalement chargée de fournir les prévisions météorologiques.
- les exploitants des aménagements hydroélectriques qui interviennent pour la fourniture d'informations concernant l'état et l'exploitation des aménagements mais aussi pour la transmission de données issues de leurs réseaux de mesures hydrauliques et climatiques ;
- le Service cantonal des forêts et du paysage (SFP) pour la fourniture des données nivales (réseau IMIS) ;
- le bureau d'ingénieurs HydroCosmos à Vernayaz, spécialisée en modélisation hydraulique numérique ;
- le Laboratoire d'hydrologie et aménagements" (HYDRAM) de l'EPFL, spécialiste de la modélisation hydrologique,
- le Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'EPFL, qui assure la coordination du projet et qui procède au développement d'un système expert d'aide à la décision pour la gestion des crues.

Dans ce contexte de modélisation, le service des routes et cours d'eau du canton du Valais, en charge du projet de la troisième correction du Rhône, contribuera à définir les caractéristiques de fonctionnement des zones d'épanchement prévues en bordure du cours d'eau, dont la modélisation sera également intégrée à MINERVE.

Les objectifs et l'organisation du projet

Les principaux objectifs du projet Minerve tels que fixés lors de l'initiation du projet et complétés en cours d'étude peuvent se résumer comme suit :

- développer un outil de prévision des crues en temps réel couplant des informations météorologiques avec un modèle hydrologique ;
- simuler les écoulements au travers des aménagements et dans les cours d'eau, sur la base de scénarios météorologiques ;
- suivre en temps réel les écoulements au travers des aménagements et dans les cours d'eau, grâce à l'acquisition automatiques de données mesurées ;
- optimiser les consignes d'exploitation des aménagements dans l'objectif de la protection contre les crues, sur la base scénarios prévisionnels ;
- développer la convivialité de l'outil de simulation par l'intégration de panneaux de commande, de fenêtres de visualisation et par l'édition de rapports à l'intention des utilisateurs ;

- mettre cet outil à disposition de la cellule scientifique CERISE chargée d'établir les bases de décisions et d'actions à l'intention de la cellule d'intervention en cas de catastrophe « CECA/KAZE » (vidange anticipée d'ouvrages d'accumulation, décision de maintien ou d'arrêt du turbinage, ordres d'évacuation à la population, etc.)

Mis à part les aspects de développement, la formulation de ces objectifs met en évidence deux modes différents de fonctionnement et d'utilisation du modèle. Le premier correspond à une exploitation normale, en continu, qui permet de suivre l'évolution de la situation hydrologique sur le bassin versant. Le deuxième répond à une situation "de crise" dans le but d'informer et de faciliter les prises de décisions pour la protection des personnes et des biens contre les crues.

La modélisation effectuée en fonctionnement normal pourra être mise à profit pour la définition de la distribution annuelle des débits. Elle contribuera ainsi à l'étude d'assainissement des cours d'eau pour laquelle des statistiques saisonnières sont requises pour réguler les débits de base. Les informations acquises pourraient également être mises à disposition des exploitants d'aménagements dans l'objectif d'une gestion optimisée. Ce fonctionnement du modèle en continu offre le double avantage de contribuer à la valorisation des données et à la maintenance du système d'acquisition et de modélisation. Il garantit ainsi que le modèle soit opérationnel en situation de crise car exploité et entretenu par des utilisateurs expérimentés.

Ces outils informatiques d'acquisition automatique des données, de modélisation météorologique, hydrologique et hydraulique et d'aide à la décision sont destinés à une cellule scientifique de crise (CERISE) dont le rôle est de conseiller l'état-major de la cellule catastrophe (CECA/KAZE) et les communes, auxquels appartiennent les prises de décisions.

Les axes de développement

Le projet MINERVE est organisé selon cinq axes de développement, tous indispensables pour rendre le système opérationnel :

- la gestion administrative est de la compétence du canton, elle consiste principalement à assurer l'exploitation du modèle et à régler les questions relatives à la publication, à l'archivage et à la propriété des données, aux droits d'accès, à la sécurité et la fiabilité du système informatique et des moyens de transmission;
- le développement d'un système de communications pour l'acquisition et la diffusion des données d'entrée et de contrôle du modèle numérique; les principales données concernent les précipitations, les débits, les prévisions météorologiques et l'état opérationnel des aménagements hydroélectriques, elles seront

archivées dans une base de données qui contiendra également les résultats de simulation ;

- le développement informatique du modèle de simulation numérique du réseau naturel et des aménagements ainsi que la couche logicielle de gestion du modèle numérique vise à donner une vision claire des situations présente et prévisionnelle, il inclut également la connexion au système d'aide à la décision ;
- Les prévisions météorologiques sont fournies par MétéoSuisse à fréquence de 12 heures pour un horizon de 72 heures ; elles seront interprétées par le modèle MINERVE pour calculer la prévision des débits ; ce dernier subira une mise à jour périodique de ces variables d'état sur la base des observations;
- Les développements scientifiques concernent principalement l'affinement de l'échelle de modélisation pour tenir compte des aménagements (Guex 2000), l'extension du domaine modélisé jusqu'au Léman, la simulation de la fonte et de la gestion des stocks de neige et de glace, le développement d'un système expert d'aide à la décision pour la gestion préventive des aménagements hydroélectriques destinés à décharger le Rhône et les affluents principaux.

Conclusions et perspectives

Le modèle MINERVE permet de simuler le comportement hydrologique du réseau naturel de drainage du bassin versant du Rhône alpin, d'une surface de 5500 km², en incluant les effets produits par les aménagements hydroélectriques. Le territoire étudié est découpé en 239 sous-bassins versants eux-mêmes subdivisés en 1054 bandes d'altitude de 500 de dénivellation moyenne. La modélisation numérique de ce système complexe, effectuée à l'aide du logiciel Routing System, permet d'établir des prévisions de débits à un horizon de 72 heures sur la base des prévisions météorologiques fournies par MétéoSuisse. Le modèle prend en compte la distribution spatio-temporelle des précipitations pluviales ou neigeuses, le routage dans les cours d'eau, les captages et la rétention dans les retenues ainsi que l'exploitation des centrales hydroélectriques et des stations de pompage. Un système expert permet en outre de générer des scénarios d'exploitation préventive des aménagements dans l'objectif d'une optimisation économique de la protection contre les crues.

Par sa connexion on-line aux réseaux de mesures des stations météorologiques et hydrologiques le modèle sera pleinement opérationnel. Il permettra de suivre l'évolution des crues en temps réel, d'établir les prévisions sur la base desquelles des scénarios de gestion anticipée des aménagements pourront être définis. Ce système informatique d'acquisition automatique des données, de modélisation météorologique, hydrologique et hydraulique et d'aide à la décision sera de première utilité à la cellule scientifique de crise (CERISE)

dont le rôle est de conseiller l'état-major de la cellule catastrophe (CECA/KAZE), auquel appartiennent les prises de décisions.

Le modèle pourra être exploité en continu, pour suivre l'évolution hydrologique du bassin versant. Les résultats obtenus contribueront aux projets d'assainissement des cours d'eau pour la modulation saisonnière des débits, ils seront également utiles aux exploitants dans l'objectif d'une gestion optimisée des aménagements à accumulation. Ce fonctionnement en continu offre le double avantage de contribuer à la valorisation des données et à la maintenance du système d'acquisition et de modélisation. Il garantit l'opérationnalité du modèle en situation de crise, car exploité et entretenu par des utilisateurs expérimentés.

Le projet MINERVE fait ainsi partie des mesures prises par le canton du Valais pour améliorer la protection de son territoire contre les crues. A ce titre il convient de citer la création d'un volume réservé dans la retenue de Mattmark (Boillat et al., 2000c ; André et Boillat, 2002) et l'entreprise de la troisième correction du Rhône en cours d'élaboration. Le lien avec ce projet sera établi par l'intégration dans MINERVE des zones d'épanchement prévues le long du Rhône pour la gestion du risque résiduel.

Chapitre 2

Modélisation hydrologique

Concept de modélisation

Le concept de modélisation semi-distribuée a été choisi pour sa flexibilité et son niveau de détail permettant la modélisation simultanée d'éléments naturels et artificiels. En effet, il était nécessaire de réaliser un modèle dont le comportement puisse s'adapter aux différentes régions, aux différents processus hydrologiques locaux et aux aménagements hydrauliques présents sur le bassin versant. Il devait également permettre des modifications ultérieures sans remettre en cause la construction et le paramétrage initial.

Modélisation semi-distribuée

Parmi les nombreux types de modèles hydrologiques (modèles à base physique, modèles conceptuels, modèles distribués, modèles statistiques), les modèles conceptuels tentent de représenter les processus hydrologiques, en s'autorisant cependant certaines simplifications. Les modèles conceptuels peuvent être exploités à différentes échelles, avec un modèle hydrologique pour un grand bassin versant ou pour chaque pixel d'un modèle spatialement distribué. Une situation intermédiaire a été choisie dans ce projet, qui justifie l'appellation de modélisation semi-distribuée.

Le bassin versant est ainsi divisé en entités hydrologiques homogènes plus petites selon la morphologie du terrain et le réseau hydrographique. Le découpage doit également tenir compte des ouvrages hydrauliques importants à modéliser. Il est ainsi possible d'attribuer des paramètres différents aux sous-bassins versants déterminés et donc de varier le comportement du modèle en fonction des régions qu'il représente.

Enfin, la prise en compte des processus hydrologiques liés à la température est primordiale sur un terrain montagneux avec une forte proportion de glaciers et un enneigement hivernal important. Les sous-bassins versants ont donc été divisés en bandes d'altitude qui sont autant de modèles hydrologiques avec leur paramétrage propre (figure 2.1).

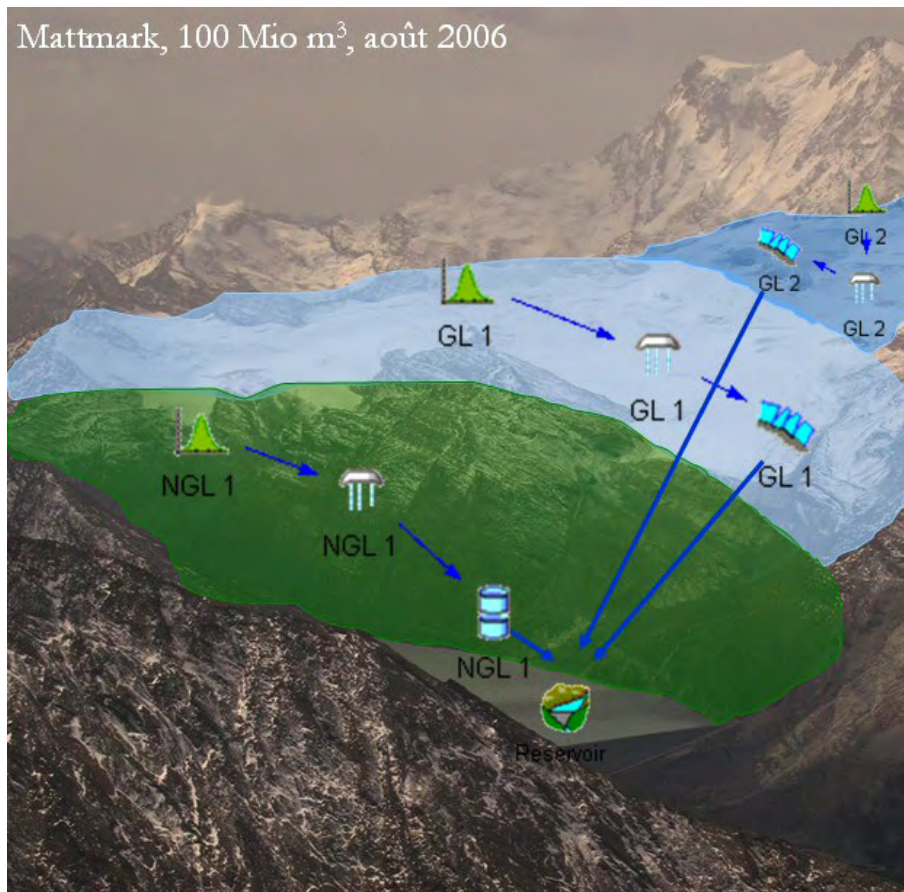


Figure 2.1 : Découpage d'un bassin versant en bandes d'altitude : exemple du bassin versant naturel de la retenue de Mattmark en Haut-Valais.

Un bassin versant de plusieurs milliers de km² se retrouve finalement divisé en dizaines de sous-bassins versants. Si les différences d'altitude entre sommet et exutoire de chaque sous-bassin sont fortes, ce nombre augmente et le modèle complet se compose alors de centaines de sous-modèles hydrologiques. Cela permet toutefois de conserver un certain contrôle des paramètres, au contraire d'un modèle distribué où le nombre de sous-modèles est supérieur d'un ordre de grandeur au moins et où le paramétrage doit être réalisé automatiquement.

Découpage hydrologique

Pour représenter le plus fidèlement possible les processus d'accumulation et de fonte de neige, de fonte de glace, d'infiltration et de ruissellement de surface, différents types de modèles en réservoirs ont été développés, qui permettent le fonctionnement du modèle en *simulation continue*. Cela signifie que le modèle n'est pas uniquement apte à reproduire des événements particuliers, mais qu'il résiste à une simulation multi-annuelle en continu. Les différentes variables produisent donc des cycles journaliers, saisonniers ou annuels selon

leurs particularités, en n'étant initialisées qu'une seule fois au début de la simulation.

Le concept hydrologique se base sur le modèle SOCONT développé à l'HYDRAM dans le cadre d'un projet d'estimation des crues extrêmes du Rhône en Valais appelé CONSECRU (Bérod, 1995, Consuegra, 1998). Ce concept a été étendu (Schaepli, 2005, Hamdi et al., 2003, 2004, 2005) et se nomme maintenant GSM-SOCONT (Glacier Snow Melt - Soil CONtribution model). Ce modèle a été utilisé lors du projet européen SWURVE pour l'estimation de l'impact des changements climatiques dans les Alpes. Il a été appliqué à la prévision des apports dans la retenue de Mauvoisin en Valais (Schaepli et al., 2005). GSM-SOCONT a également été employé lors du projet CONSECRU2 (Hingray et al., 2006) pour l'établissement des débits de projet de la Troisième Correction du Rhône, et enfin dans le cadre du projet MINERVE présenté ici.

Selon le concept de modélisation semi-distribuée avec GSM-SOCONT, les données d'entrée (variables météorologiques) sont des précipitations, des températures et des valeurs d'évapo-transpiration potentielle (ETP) et les variables de sortie sont des débits. Chaque bande d'altitude est une entité hydrologique avec ses entrées et sorties propres, qui peuvent être soit glaciaires soit non-glaciaires (figure 2.2).

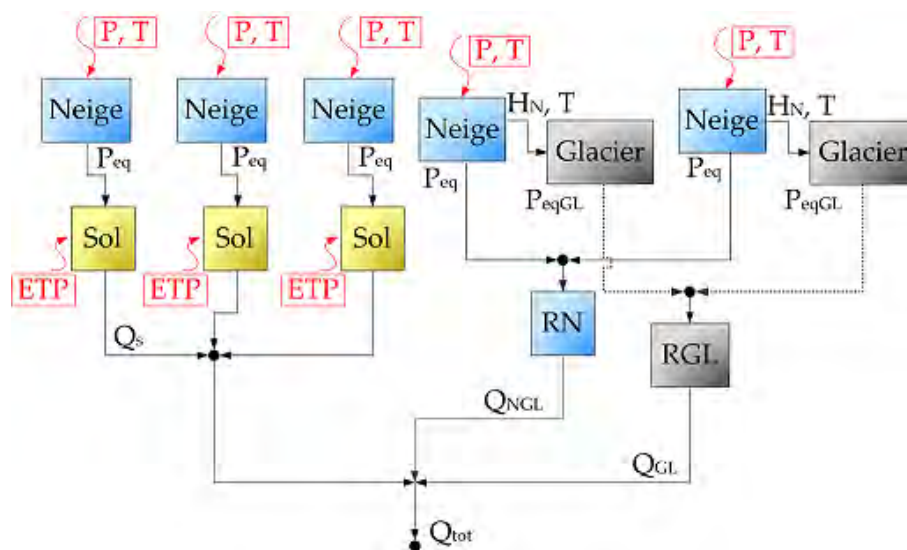


Figure 2.2 : Concept du modèle semi-distribué GSM-SOCONT. Exemple d'un sous-bassin versant avec 3 bandes d'altitude glaciaires et 2 bandes non-glaciaires.

Dans le cas glaciaire, un modèle de fonte de neige (*Neige*) reçoit en entrée les variables météorologiques des précipitations P et des températures T . Il est connecté en série à un modèle de fonte glaciaire (*Glacier*). La pluie équivalente P_{eq} produite par la fonte de neige est transférée au réservoir linéaire de neige R_N qui produit un débit de fonte de neige Q_{NGL} . Si la hauteur de neige H_N sur le glacier est nulle,

le modèle de fonte de glace produit une pluie équivalente glaciaire P_{eqGL} acheminée vers le réservoir linéaire de glace R_{GL} . Ce dernier fournit le débit de fonte glaciaire Q_{GL} .

Dans le cas non-glaciaire, le modèle de fonte de neige transfère la pluie équivalente P_{eq} au réservoir-sol Sol. Ce dernier accepte également en entrée l'ETP et fournit à l'exutoire le débit Q_s , somme d'une composante d'infiltration et de ruissellement de surface. Finalement, le débit à l'exutoire de la bande d'altitude Q_{tot} est la somme de Q_s , Q_{NGL} et Q_{GL} .

Modèle de fonte de neige

Le modèle de fonte de neige utilisé dans la modélisation n'est pas décrit en détail dans cet ouvrage, mais son concept de fonctionnement est présenté ici. Les développements mathématiques peuvent être consultés dans *Jordan (2007)*, et *García et al. (2007)*.

Le concept du modèle de fonte de neige est un système à deux réservoirs (figure 2.3), qui respectent les équations de continuité. Tout d'abord, la précipitation totale P est séparée en précipitation liquide (pluie P^*) et solide (neige N) en fonction de la température. La neige alimente directement le premier réservoir qui représente le stock de neige H_N sur le sol. Lorsque la température est inférieure à la température critique de fonte, le stock de neige subsiste et augmente avec les précipitations. Si au contraire la température augmente et dépasse la valeur critique, le stock de neige fond et produit une intensité de fonte M_N transférée au deuxième réservoir, représentant le contenu en eau de la neige W_N . Ce deuxième réservoir est également directement alimenté par les précipitations liquides P^* . L'intensité de fonte est calculée selon un modèle de type degré-jour et peut également être considérée dans l'autre sens, c'est-à-dire le regel du contenu en eau.

Lorsque le contenu en eau de la neige excède une valeur seuil θ_{cr} , une intensité de pluie équivalente P_{eq} est produite et transférée vers l'aval, par exemple vers un modèle d'infiltration-ruissellement ou vers un modèle de fonte glaciaire.

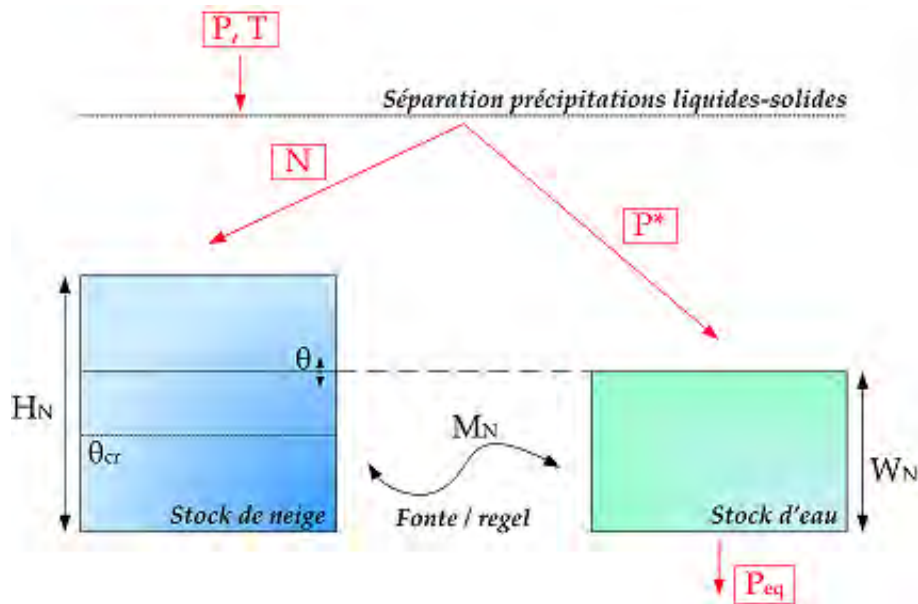


Figure 2.3 : Concept du modèle de fonte de neige, composé de deux réservoirs.

Modèle de fonte glaciaire

Le modèle de fonte glaciaire se compose de trois réservoirs (figure 2.2). Le premier réservoir ne respecte pas la condition de continuité. Il s'agit d'un réservoir de masse constante produisant une intensité de fonte de glace P_{eqGL} . Cette dernière est calculée par un modèle de type degré-jour. La relation entre la température et l'intensité de fonte glaciaire est donc constante au cours du temps, même sur une période théorique de plusieurs dizaines d'années. Si toutefois de la neige se trouve encore sur la surface du glacier, aucune intensité de fonte glaciaire n'est produite. Cette dernière information est produite par le modèle de fonte de neige situé sur la bande glaciaire.

L'intensité de fonte glaciaire est acheminée vers le deuxième réservoir, appelé réservoir linéaire de glace R_{GL} . Ce réservoir permet d'amortir le signal d'intensité de fonte glaciaire et d'adapter le comportement du modèle au temps de réponse du glacier.

Le troisième réservoir appelé réservoir linéaire de neige R_N reçoit en entrée l'intensité de pluie équivalente de fonte de neige du modèle de neige situé sur la bande glaciaire. Il permet également d'amortir ce dernier signal.

Au final, le débit sortant du modèle de fonte glaciaire est composé de la fonte de la neige et de la fonte de la masse glaciaire.

Modèle d'infiltration-ruissellement

Le modèle d'infiltration-ruissellement, appelé SOCONT, est composé de deux réservoirs (figure 2.4). Le premier réservoir est le modèle de production GR3. Recevant en entrée l'évapo-transpiration potentielle ETP et la précipitation équivalente P_{eq} (pluie brute ou fonte de neige), il fournit en sortie un débit de base Q_b , une intensité nette de ruissellement i_{net} et une évapo-transpiration réelle ETR. Le débit de base est directement acheminé à l'exutoire du sous-bassin versant, l'ETR sort du modèle et l'intensité nette est transmise au deuxième réservoir.

Le deuxième réservoir SWMM transforme le signal de l'intensité nette de ruissellement reçue du réservoir GR3 en un débit ruisselé, à la suite d'un calcul de rétention sur un plan incliné. La loi de frottement employée est celle de Manning-Strickler.

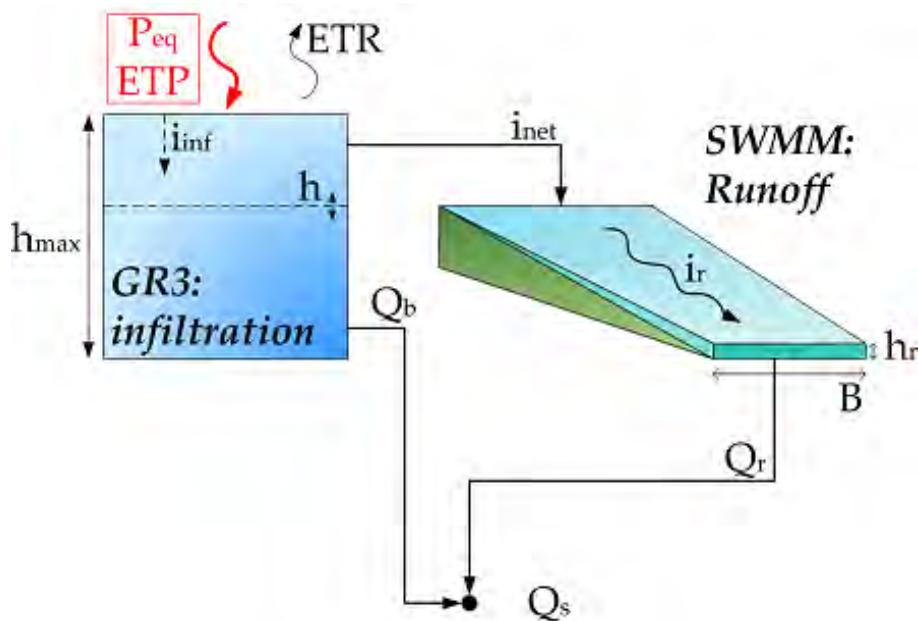


Figure 2.4 : Concept du modèle d'infiltration-ruissellement SOCONT, avec ses deux réservoirs GR3 et SWMM.

Routage dans les cours d'eau

Le routage dans les cours d'eau peut se calculer par 3 différents modèles dans *Routing System II*. Le premier calcule le transfert du débit de l'amont vers l'aval par un calcul d'onde dynamique simplifié. Le logiciel ne permettant pas l'information de remonter de l'aval vers l'amont, une condition limite aval raisonnable est calculée (hauteur normale en écoulement uniforme). Cette méthode de résolution convient aux cours d'eau à très faible pente mais nécessite des temps de calcul relativement importants. Le deuxième modèle calcule le routage selon Muskingum-Cunge. Il s'agit d'un calcul d'onde diffusante. Le troisième modèle est un routage de type cinématique. C'est ce dernier qui est employé systématiquement dans le modèle *Routing System II* du bassin versant du Rhône.

Les cours d'eau sont modélisés par tronçons : sur chaque tronçon, aucun apport latéral ne peut être considéré. Le tronçon de cours d'eau est admis prismatique. L'information d'entrée est le débit amont et l'information de sortie le débit aval du tronçon.

Chapitre 3

Le logiciel *Routing System II*

Le logiciel *Routing System II* a été développé par Jérôme Dubois au sein du Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Ce logiciel a été conçu pour simuler la formation et la propagation des crues dans des bassins versants complexes et permet la modélisation hydrologique et hydraulique à l'aide de modèles conceptuels semi-distribués et une approche orientée objet. Il permet aussi la prise en compte non seulement de processus hydrologiques particuliers tels que la fonte de neige et de glace, les écoulements de surface et de sub-surface à travers un bassin versant, mais il est également adapté à la modélisation d'ouvrages régulés tels que retenues, vannes, évacuateurs de crue, prises d'eau, turbines ou pompes, galeries et autres ouvrages hydrauliques. Il est écrit en langage VB.Net, spécialisé pour la programmation objet.

Contenu

- Introduction
- Interface utilisateur
- Concept de modélisation et objets
- Traitement et résultats

Introduction

Routing System II est un outil de calcul numérique dédié à la modélisation hydrologique et hydraulique sur des bassins versants complexes. L'ensemble du comportement de systèmes simples ou complexes est modélisé en suivant le principe d'une description fonctionnelle des éléments d'un système d'écoulements en nappe libre et non maillé.

Interface utilisateur

Compilé sous forme de programme exécutable standard, *Routing System II* offre tout le confort d'une interface graphique moderne. Cette interface permet la création du modèle hydrologique ainsi que sa simulation numérique. Un effort particulier a été consenti à la visualisation graphique de toutes les données et résultats à référence temporelle, fonctionnalité indispensable à la vérification du modèle de calcul et à l'analyse des résultats.

Comme éléments d'interface, *Routing System II* propose tous les standards tels la barre des menus et la barre d'outils, ainsi qu'une palette d'objets.

Menu

La barre des menus contient les éléments généraux présentés ci-dessous :

- File :

-*New, Open, Save As, Save, Data Environment, Close, Exit*

-*Add Existing Model* : Ouverture d'un nouveau modèle dans la même interface graphique.

-*Select Current Model* : Sélection du modèle à calculer ou modifier, lorsque plusieurs modèles sont chargés.

- Edit :

-Pas encore défini

- Model :

-*Edit as Objet, Save Sub Model as...*

- **Solver :**

-*Solve* : Démarrage classique de la simulation.

-*Solve Update* : Démarrage de la simulation avec mise à jour des variables d'état.

-*Edit Solver* : Modification de la date de début de la période de calcul (« *Date Start* »), de la date de fin (« *Date End* »), du pas de temps auquel sont calculées les variables (« *Constant Time Step* ») et du pas de sauvegarde des données (« *dt Save* »).

- **Update**

-*Import Initial Conditions* : Importation des paramètres et conditions initiales des modèles hydrologiques et hydrauliques (neige, glacier, GR3, SWMM, cours d'eau et réservoirs).

-*Export Initial Conditions* : Exportation des paramètres et conditions initiales des modèles hydrologiques et hydrauliques (neige, glacier, GR3, SWMM, cours d'eau et réservoirs).

-*Special _ Convert Initial Conditions* : Récupération de la dernière valeur calculée et implémentation de celle-ci en condition initiale.

-*Edit Update* : Modification des coefficients multiplicateurs globaux (« *Intensity coeff* », « *Temperature coeff* », « *ETP coeff* ») ; modes de simulation (« *HotStart* », « *Prediction Mode* », « *Correction Initial State (global)* ») ; choix des modèles mis à jour (« *Hini GR3* », « *Hini SWMM* », « *Hini snow* », « *Qini, gl, snow* », « *Qini gl* ») ; valeurs initiales par régions ; paramétrage de la mise à jour.

-*Set File Path* : Paramétrage du répertoire de transfert des fichiers de calcul (conditions initiales, paramétrage, résultats).

- **Expert System**

-*Initialize Regulation* : Choix du mode d'opération des aménagements hydroélectriques. *Bases de Données* : selon mesures dans la base de données ; *Programme* : programme commercial généré stochastiquement ; *TP* : selon consignes de turbinage préventif provenant du modèle d'optimisation.

-*Import Optimized Operations* : Importation des ordres de turbinage et vidange préventifs fournis par le modèle d'optimisation.

-*Import Programme Operations* : Génération de programmes de turbinage selon les dates de simulation et importation des séries temporelles.

-*Export Simulation HPP* : Exportation des résultats du modèle avec aménagements hydroélectriques (données pour le modèle d'optimisation).

-*Export Simulation Natural*: Exportation des résultats du modèle sans aménagements hydroélectriques (données pour le modèle d'optimisation).

-*Control Board*: Paramétrage du fonctionnement des turbines, pompes et captages contrôlés, ajustement du taux d'ouverture des vidanges, lancement d'une optimisation.

Barre des outils

Avec la barre des outils il est possible de:



Nettoyer l'interface graphique et effacer le modèle en cours



Ouvrir un modèle



Enregistrer le modèle actif. Chaque modèle est sauvegardé dans un fichier (*.sim).



Choix de la flèche dans l'interface graphique



Connexion entre objets (le curseur devient une croix)



Connexion entre états en mode régulation



Voir tableau des caractéristiques de l'objet ou du sous-modèle si l'objet sélectionné en est un.



Descendre d'un niveau hiérarchique



Effacer l'objet sélectionné



Ouvrir le *Data Environment*

Palette d'objets

Les objets disponibles pour construire un modèle sont affichés dans la palette d'objets présentée à la figure 3.1. En cliquant une fois sur un objet, il est activé et apparaît dans l'interface graphique. Un double-clic sur ce dernier fait apparaître ses propriétés.

Dans la fenêtre « *Propriétés* », également appelée « *Generic Object* », le nom de l'objet (« *Description* »), et sa position (« *X* », « *Y* ») sur l'interface graphique peuvent être modifiés. D'autres variables peuvent être également modifiées, comme celle des valeurs des paramètres, les valeurs initiales ou certaines séries de valeurs.

Une liste d'objets hydrauliques fondamentaux ou éléments de base (réservoirs, tronçon de cours d'eau, neige,...) caractérisés chacun par leur fonction hydraulique propre a été définie. Par leur combinaison, ces objets permettent de construire des fonctions plus complexes, qui peuvent elles-mêmes être agrégées dans de nouveaux sous-modèles.

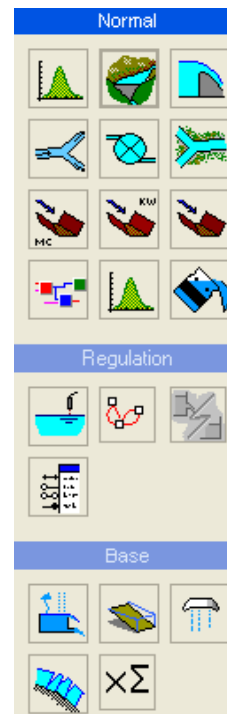


Figure 3.1: Objets

Base de données

Routing System II fonctionne actuellement en combinaison avec une base de données *MS Access*. La structure de cette base de données est présentée à la figure 3.2. Il s'agit d'une base de données relationnelle composée de 4 tables.

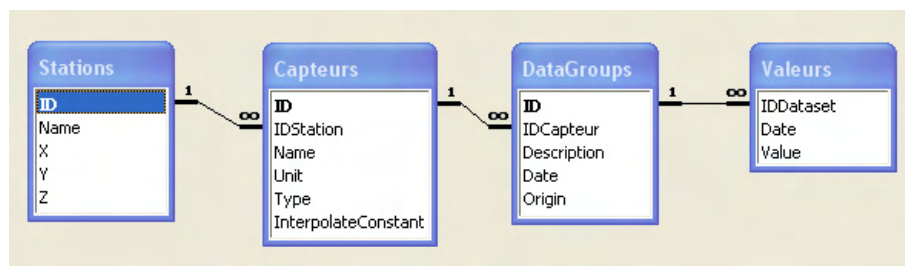


Figure 3.2 : Relations entre tables de la base de données Access

La procédure pour construire les nouvelles bases de données consiste en premier lieu à créer une nouvelle base de données vide. Ensuite, toutes les tables nécessaires peuvent être remplies selon les relations déjà créées.

Table « Stations » : Il s'agit de la table de haut niveau contenant le nom des stations et leurs coordonnées.

Table « Capteurs » : Dans la deuxième table de la base de données se trouvent les paramètres mesurés ainsi que leurs unités correspondantes.

Table « DataGroup » : Dans cette table sont conservées les métadonnées liées à une série temporelle.

Table « Valeurs » : Finalement, la table des valeurs est nécessaire pour saisir les séries temporelle (date, valeur).

Ces bases de données sont chargées en mémoire vive dans le *Data Environment* et fournissent aux modèles *Routing System II* les conditions de bord hydro-météorologiques. Un exemple de base de données Access est présenté à la figure 3.3.

The screenshot shows an Access database window titled "Stations : Tabla". It displays four tables in a hierarchical view:

- Stations Table:** Contains columns ID, Name, X, Y, and Z. It lists six stations: 1 Simplon-Dorf, 2 Brig, 3 Visp, 4 Ackersand, 5 Grächen, and 6 Zermatt.
- Capteurs Table:** Contains columns ID, Name, Unit, Type, and InterpolateCons. It lists one sensor: 7 Pluie (mm/h).
- DataGroup Table:** Contains columns ID, Description, Date, and Origin. It lists one data group: 7311 Heure (17.01.2005 09:12:01 SMA).
- Valeurs Table:** Contains columns Date and Value. It lists 26 records of values for the date 01.10.1986, ranging from 01:00:00 to 15:00:00.

The bottom status bar indicates "Registro: 26 de 10968".

Figure 3.3 : Base de données Access avec ses quatre tables

Concept de modélisation et objets

Routing System II est un logiciel de dernière génération utilisant le concept de programmation orientée objets. Il a été développé pour simuler la formation et la propagation des crues dans des bassins versants complexes, constitués d'un ensemble de bassins versants, de prises d'eau, de réservoirs, de galeries et autres ouvrages hydrauliques. Tous les ouvrages sont décrits par la fonction hydraulique qu'ils exercent au sein du système, comme la dérivation, le stockage dans les réservoirs ou le transport dans les cours d'eau. Ces fonctions, représentées par des icônes, peuvent être assemblées librement sur une fenêtre. Le flux des données entre ces fonctions est réalisé en connectant les icônes entre elles à l'aide de la souris. Cette approche permet la modélisation de systèmes de grande taille ainsi que l'analyse à différentes échelles par agrégation de sous-systèmes.

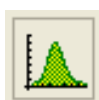
Concept de modélisation

La simulation de l'ensemble des écoulements se produisant dans les modèles est effectuée par la résolution de différentes équations pour chaque objet. Une liste d'objets hydrauliques fondamentaux ou éléments de base (réservoirs, tronçon de cours d'eau, neige,...) caractérisés chacun par leur fonction hydraulique propre a été définie. Par leur combinaison, ces objets permettent de définir des fonctions plus complexes, qui peuvent être agrégées dans de nouveaux sous-modèles.

Le logiciel *Routing System II* contient les objets dont la liste et les principales caractéristiques sont énumérées ci-dessous :

Principaux objets

Station virtuelle

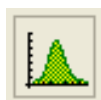


La *station virtuelle* est considérée au centre de gravité d'un sous-bassin versant. Elle permet l'accès à la base de données et la spatialisation des données de température, précipitation et ETP. Dans ce but, elle emploie un système géo-référencé en coordonnées pour effectuer une interpolation spatiale avec les stations les plus proches. Les paramètres de l'objet *station virtuelle* sont:

- Coordonnées réelles (« *X* », « *Y* » et « *Z* »).
- Rayon de recherche (« *Search Radius* »)
- Gradient altimétrique des précipitations (« *Gradient i* »)
- Gradient altimétrique des températures (« *Gradient T* »)

- Gradient altimétrique de l'ETP (« *Gradient ETP* »),
- Coefficient multiplicatif des précipitations (« *Coeff P* »)
- Coefficient multiplicatif des températures (« *Coeff T* »)
- Coefficient multiplicatif de l'ETP (« *Coeff ETP* »)

Série temporelle



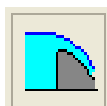
Dans l'objet *série temporelle* peuvent être introduites directement les valeurs de débit, précipitation, température ou ETP. Le temps doit être saisi en secondes et les valeurs associées en m/s, m³/s ou °C. Des séries d'autres types de valeurs peuvent également être saisies dans cet objet.

Réservoir



Les *réservoirs* représentent la fonction de stockage dans une retenue. Les paramètres à introduire sont la relation niveau-volume et le niveau initial du réservoir au début de la simulation. Il est recommandé de saisir les niveaux en altitudes réelles (m s.m.).

Déversoir



L'objet déversoir représente la fonction d'évacuation caractérisée par la relation niveau-débit sortant. Des déversoirs standards, des orifices ou des vannes réactives au niveau peuvent être modélisés par cet objet.

Tronçon de cours d'eau

Les possibilités de modélisation du routage dans les cours d'eau sont diverses puisque les méthodes de Muskingum-Cunge, onde cinématique ou onde dynamique, peuvent être considérées.



Muskingum-Cunge



Routage cinématique

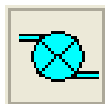


ROUTAGE DYNAMIQUE SELON ÉQUATIONS COMPLÈTES DE ST. VENANT

Dans tous les cas, les paramètres à saisir sont relatifs à une section trapézoïdale constante sur tout le tronçon :

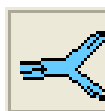
- Largeur moyenne du fond du cours d'eau (« B_O »)
- Fruit (« m »)
- Pente moyenne (« J_O »)
- Rugosité selon Strickler (« K »)
- Longueur du tronçon (« L »)
- Débit initial (« Q_{ini} »)
- Zone où se trouve le cours d'eau (« $Zone$ »)

Turbine / Pompe



Cet objet effectue un soutirage ou une adduction de débit provenant d'un réservoir et allant vers une jonction ou un cours d'eau. Les paramètres d'entrées sont les séries temporelles de débit à soutirer.

Prise d'eau (dérivation)



Tous les ouvrages hydrauliques de prises d'eau partagent la même fonctionnalité, celle de séparer des débits. Cette fonction requiert la connaissance de la relation « *Débit entrant – Débit dérivé* » (l'utilisateur doit effectuer un calcul du comportement de la prise d'eau et créer ensuite cette relation). Grâce à cette information synthétique, la fonction « *Dérivation* » de *Routing System II* est à même de calculer l'hydrogramme dérivé et l'hydrogramme qui continue « tout droit ».

Jonction



La fonction « *Jonction* » de *Routing System II* permet d'additionner deux fonctions. En particulier, elle est capable d'additionner deux hydrogrammes (ou plus) à une confluence.

Sous-modèle



Tous les sous-modèles qui ont été précédemment sauvegardés peuvent être importés dans le modèle en cours en tant que sous-modèles.

Source



Avec cet objet les valeurs de débit mémorisées dans la base de données peuvent être récupérées et introduites dans le modèle, soit comme source de débit, soit comme série temporelle de turbinage ou pompage.

Capteur



L'objet *capteur* est une mesure d'un paramètre à définir. Cet objet peut également contenir des valeurs seuil qui, lorsqu'elles sont atteintes, provoquent une alarme. Cet objet est utilisé dans le cadre d'une régulation.

Régulation

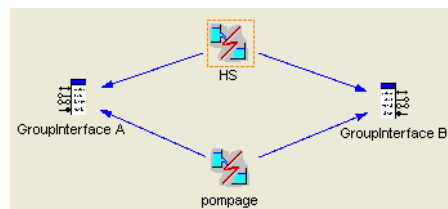


L'objet *régulation* crée un environnement particulier dans lequel est construite une régulation, c'est-à-dire un sous-modèle dont plusieurs comportements peuvent être simulés. En pratique, une régulation permet d'enclencher ou déclencher automatiquement une turbine en fonction du niveau d'une retenue, ou d'ouvrir ou fermer une vidange en fonction d'un débit dans un cours d'eau. L'état vidange ouverte et l'état vidange fermée devront alors être créés dans cet environnement.

État



Dans le sous-modèle régulation, plusieurs «*État*» doivent être implémentées. Les transitions entre états sont définies par les valeurs seuil des capteurs.



Connexion entre états



Cet objet transforme le curseur de flèche en croix et permet la connexion entre états au sein d'une régulation.

GroupInterface



Cet objet est indispensable pour effectuer l'assemblage entre sous-modèles. Il regroupe toutes les entrées et les sorties d'un sous-modèle et les transfère vers une autre *GroupInterface*. Si un sous-modèle est créé, il faut donc également créer un objet « *GroupInterface* » qui permettra la transmission des variables vers un autre objet extérieur au sous-modèle.

GR3



Une fonction de production permet de déterminer la part de la pluie tombée qui participe au ruissellement de surface. Elle transforme donc une pluie brute en pluie nette. Le modèle dénommé *GR3* est une fonction de production fondée sur un modèle de réservoir. Il permet à la fois de transformer une pluie brute en pluie nette, de calculer un débit de base et une évapotranspiration réelle. Le modèle *GR3* est particulièrement bien adapté aux simulations hydrologiques continues par le fait que sa capacité d'infiltration augmente lors des périodes sans pluie et par la prise en compte de l'évapotranspiration, indispensable à l'établissement de bilans hydriques à long terme.

SWMM



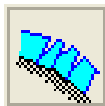
En hydrologie, une fonction de transfert permet de calculer un hydrogramme de crue à partir d'une pluie nette. Le modèle *SWMM* est un modèle conceptuel global de réservoir non-linéaire résultant de la combinaison de la loi de frottement empirique de Manning-Strickler et de l'équation de continuité. Dans le modèle *SWMM*, la loi de frottement est identique à la loi de vidange du réservoir.

Neige



Le modèle de *neige* simule l'évolution au cours du temps du réservoir de neige (accumulation et fonte) en fonction de la température (T) et de la précipitation (P) et produit une précipitation équivalente (P_{eq}) qui est normalement utilisée comme entrée par le modèle d'infiltration ou par le modèle glaciaire.

Glacier



Le modèle de *glacier* simule la fonte glaciaire par un modèle degré-jour dont le signal est amorti au travers de réservoirs linéaires. Le débit sortant du modèle est fonction de la précipitation équivalente provenant de la fonte de neige ou glaciaire, de la température et de la présence ou non de neige sur le glacier.

Somme



La fonction « *Somme* » est une fonction d'addition incluant un coefficient multiplicateur de n'importe quel paramètre. Il permet la transformation linéaire de deux séries temporelles.

Traitement et résultats

Le logiciel *Routing System II* est destiné à modéliser des réseaux hydrauliques et hydrologiques complexes. Ce chapitre présente un aperçu de la manière d'effectuer une simulation numérique à l'aide de cet outil.

Démarrage de *Routing System II*



Le programme *Routing System II* est représenté sous forme d'icône sur le bureau de Windows. Pour démarrer le programme, il suffit de la double-cliquer. Après démarrage apparaît la fenêtre principale (figure 3.4). Dès cet instant, un nouveau modèle peut être construit ou un modèle existant peut être chargé.

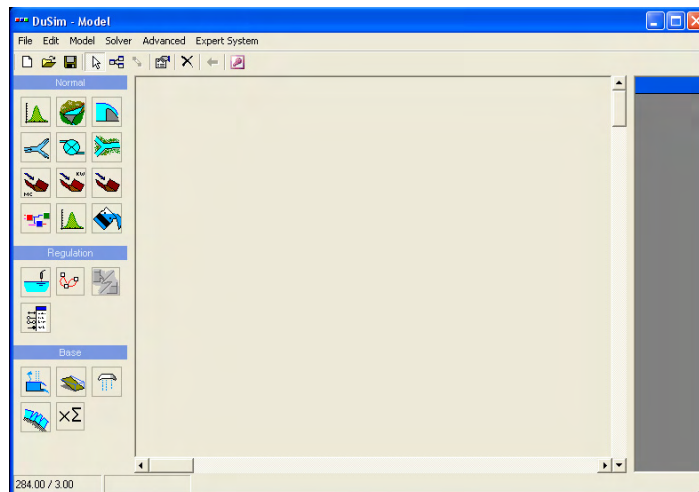



Figure 3.4 : Fenêtre principale de Routing System II

Construction du modèle hydrologique


La manière de réaliser un nouveau modèle est simple. Pour procéder à la création d'objets il faut cliquer une fois sur l'objet désiré dans la « *Palette d'objets* » et celui-ci apparaît directement dans l'interface graphique. Après sa création, l'objet peut être déplacé manuellement pour arranger le modèle selon la topologie définie par l'utilisateur.

En double-cliquant sur n'importe quel objet visible sur l'interface graphique, une boîte de dialogue s'ouvre et présente ses caractéristiques. Il est alors possible de saisir les valeurs des paramètres associés à l'objet.

La connexion entre objets s'effectue de l'amont vers l'aval après avoir sélectionné l'icône  de la « *Barre des Outils* » ou de taper sur la barre d'espace. La flèche de la souris se transforme alors en une croix et il est possible de cliquer sur l'objet amont et de le relier à l'objet aval sans lâcher le bouton de la souris. Si aucune flèche n'apparaît, les objets ne sont pas compatibles et ils ne peuvent pas être connectés directement.

Les objets sont donc reliés par l'utilisateur de l'amont vers l'aval et le logiciel valide automatiquement la connexion si les variables à transmettre sont compatibles. En double-cliquant sur la flèche, les caractéristiques de la variable transférée d'un objet à un autre sont affichées.

Démarrage d'une simulation numérique

Avant d'effectuer une simulation, il faut qu'un modèle hydrologique apparaisse sur la fenêtre de travail. Seuls les objets affichés dans la fenêtre seront calculés (figure 3.5). Il est donc possible de ne calculer qu'une partie d'un modèle pour effectuer des vérifications particulières et économiser du temps de calcul. Pour charger un modèle existant, il suffit de cliquer sur l'icône  ou atteindre le menu *File* → *Open...* et sélectionner le modèle désiré.

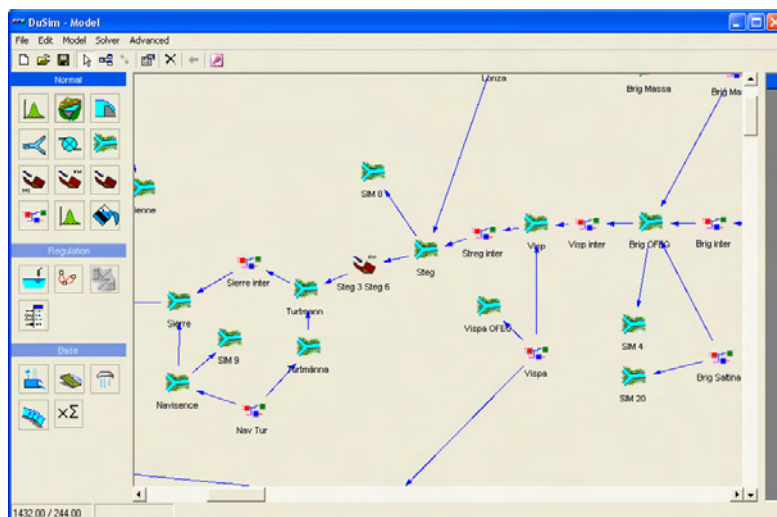



Figure 3.5 : Exemple de structure RSII dans Minerve

Si le modèle fonctionne avec des *stations virtuelles*, il est nécessaire de charger la base de données comprenant les variables hydro-météorologiques de la période à simuler. Pour ce faire, un clic sur  ou le Menu *File* → *Data Environment...* est suffisant. Le fichier *Access* peut alors être chargé en sélectionnant *File* → *Open Access*.

Dans cette base de données se trouvent les séries temporelles des précipitations (hyétogrammes), des ETP et des températures de la période choisie, en différents endroits (stations de mesures) disséminés sur le bassin versant (figure 3.6).

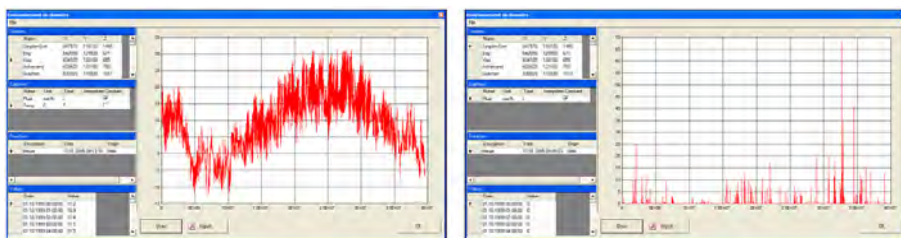


Figure 3.6 : Séries de précipitation et température de la base de données.

Un fois la base de données chargée, il est possible de lancer une simulation. Pour démarrer le calcul il faut tout d'abord choisir la période de simulation en cliquant sur le Menu *Solver* → *Edit Solver* et modifier les paramètres suivants :

- date du début de simulation (« *Date Start* »)
- date de fin de simulation (« *Date End* »)
- pas de temps auquel sont calculées les variables (« *Constant Time Step* »)
- pas de temps pour la sauvegarde des données (« *dt Save* »)

Il ne reste plus qu'à démarrer le calcul au menu *Solver* → *Solve*. Il y a différentes possibilités de démarrage, en fonction des besoins, qui sont commentées au paragraphe suivant.

Modes de simulation

Les différents modes de simulation sont adaptés aux besoins du modèle *MINERVE*. Ils permettent la simulation normale, avec mise à jour ou en mode prévision.

Mode normal

Ce mode permet la simulation hydrologique et hydraulique sur la période déterminée dans les paramètres. Les conditions initiales utilisées sont celles paramétrées en dur dans les objets du modèle. Pour employer cette méthode, il suffit d'utiliser le menu *Solver* → *Solve*.

Mode « *HotStart* »

Le deuxième mode est le démarrage avec « *HotStart* », qui récupère les valeurs des variables d'état à un instant choisi pour les utiliser comme conditions initiales. Il permet ainsi d'avoir de nouveaux niveaux initiaux dans les réservoirs (GR3, SWMM, Glacier, Cours d'eau, Réservoirs) correspondant à une date de la simulation précédente.

La démarche pour effectuer des simulations en mode « *HotStart* » consiste à effectuer un premier calcul en mode normal et à conserver le modèle simulé. Il faut ensuite paramétrer la nouvelle date de début de simulation, comprise dans la période qui vient d'être simulée, et activer l'option « *HotStart* » dans le menu *Solver* → *Edit Update* → *General* → *Hot Start* (figure 3.7). Après avoir fermé la fenêtre, une deuxième simulation peut être lancée au menu *Solver* → *Solve*.

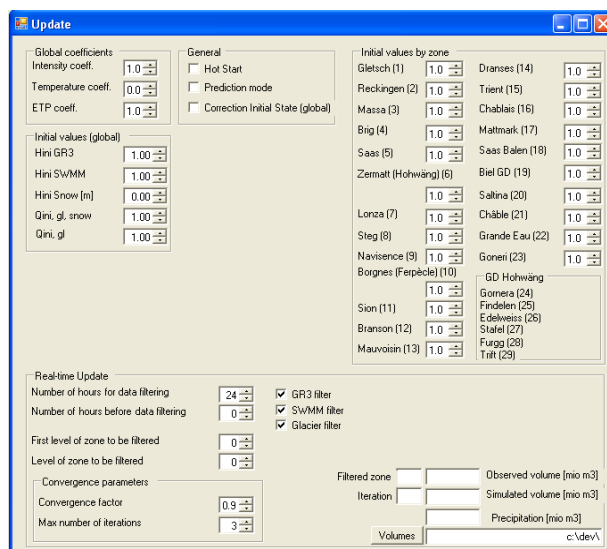


Figure 3.7 : Panneau de commande RSII

Démarrage en mode prévision

Un troisième mode de calcul est le mode prévision (« *Prediction Mode* »). Il s'agit d'un outil avec lequel les *stations virtuelles* du modèle créé prennent directement les valeurs de précipitation et température dans la base de données sans effectuer de spatialisation. Cette méthode ne doit être employée que lorsque la base de données chargée en mémoire provient des prévisions MétéoSuisse.

Avant de lancer une prévision hydrologique, il est conseillé de déterminer les meilleures conditions initiales. Cette opération est réalisée en optant pour le mode « *HotStart* ». Tout d'abord, il s'agit de réaliser une simulation avec les variables hydro-météorologiques mesurées sur une longue période de plusieurs mois avant la date de prévision. Cela permet au modèle d'ajuster correctement les variables

d'état actuelles (H_N , θ , h , h_r , H_{NGL} et H_{GL}). Ensuite, il s'agit de réaliser une deuxième simulation en mode « *HotStart* » et « *Prediction Mode* », sans oublier de charger la nouvelle base de données contenant les prévisions MCH. Il est également possible de sauvegarder le modèle précédemment calculé ou de convertir ses variables d'état en conditions initiales et d'exporter ces paramètres.

Mode « *Correction Initial State (Global)* »

Avec cette méthode les coefficients « *Global Coefficients* » sont employés comme coefficients multiplicateurs de la précipitation et de l'ETP. Le « *Global Coefficients* » de la température est une valeur ajoutée ou soustraite à la série.

Mode « *Solve Update* »

Le dernier mode de simulation présenté dans ce chapitre est appelé « *Solve Update* ». Il s'agit d'une fonction permettant la mise à jour des variables d'état du modèle hydrologique par comparaison entre volumes simulés et mesurés sur une certaine période. Le processus est itératif et de nombreuses zones du modèle sont mises à jour les unes après les autres selon la topologie du bassin versant. Cette fonction a été paramétrée en dur dans le modèle et les zones de calcul peuvent être consultées dans chaque objet concerné dans le champ « *Zone* ». Il est possible de paramétrer cette fonction en déterminant les niveaux de zone initiale et finale à filtrer, le nombre d'heures pendant lesquelles sont évalués les volumes, le facteur de convergence et le nombre maximum d'itérations pour chaque niveau de zone. Cette mise à jour se fait actuellement sur 29 zones différentes.

La mise à jour ne doit s'effectuer qu'avec une base de données contenant les variables hydro-météorologiques mesurées et les débits mesurés aux 29 points de contrôle programmés. Le programme débute par les zones situées en tête de bassin versant et ajuste les conditions initiales des modèles hydrologiques pour que le volume ruisselé corresponde au volume mesuré en un point. Une fois cette mise à jour effectuée, le niveau de zone suivant est considéré.

Il est donc nécessaire d'activer le mode « *Hot Start* » avant de lancer le calcul avec *Solver* → *Solve Update*.

Visualisation des résultats

Une fois la simulation terminée, toutes les variables telles que débits, hauteurs d'eau dans les réservoirs, hauteurs de neige, etc. peuvent être affichées en double-cliquant sur n'importe quel objet.

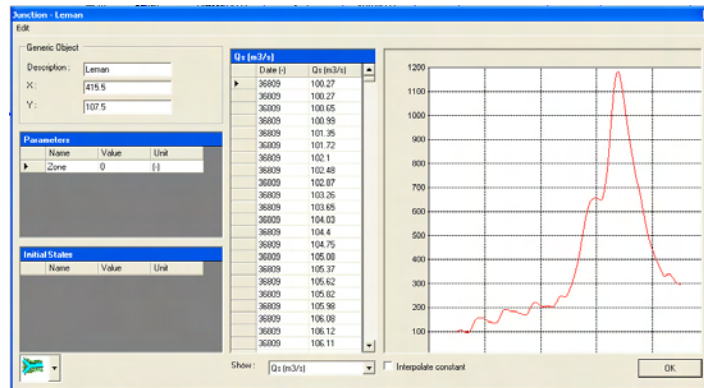


Figure 3.8 : Exemple d'hydrogramme calculé

S'il y a plus d'une variable calculée, il faut choisir la variable désirée dans la liste déroulante « Show ».

Chapitre 4

Le modèle numérique MINERVE

Le modèle numérique MINERVE est l'outil de modélisation hydrologique du bassin versant du Rhône implémenté dans *Routing System II*.

Ce chapitre présente la construction du modèle, l'implémentation des aménagements hydroélectriques, la procédure de calage et validation du modèle hydrologique et finalement sa performance en simulation continue.

Contenu

- Description du modèle numérique MINERVE
- Calage et validation du modèle hydrologique
- Performance du modèle en simulation continue

Description du modèle numérique MINERVE

La modélisation du bassin versant du Rhône a été réalisée en plusieurs étapes permettant la représentation la plus réaliste possible des processus hydrologiques et hydrauliques essentiels pour la prévision des crues :

- Collecte des données structurelles et fonctionnelles des aménagements hydroélectriques.
- Discretisation du bassin versant en unités hydrologiques homogènes et tenant compte des contraintes liées à la modélisation des aménagements hydroélectriques.
- Extraction des paramètres géomorphologiques des sous-bassins versants par exploitation d'un système d'information géographique (SIG).
- Etablissement de la topologie du réseau hydrographique naturel et artificiel.
- Construction du modèle hydrologique dans *Routing System II* selon la topologie préalablement établie.
- Contrôle de l'implémentation des objets hydrologiques et hydrauliques, de la topologie et du paramétrage par vérification détaillée du comportement du modèle.

Données structurelles et fonctionnelles des aménagements hydroélectriques

Les données minimales nécessaires à la modélisation des aménagements hydroélectriques doivent permettre de localiser les ouvrages, leurs liens topologiques et leurs grandeurs caractéristiques afin de définir avec exactitude les contraintes pour le découpage des sous-bassins versants. Les ouvrages et leurs caractéristiques essentielles sont résumés dans la liste ci-dessous selon une logique amont - aval:

- Prise d'eau (captage en rivière) : coordonnées (x,y,z), loi de dérivation (relation débit amont - débit dérivé), liens topologiques aval.
- Collecteur : longueur, section, pente moyenne, rugosité, lien topologique aval.
- Ouvrage de décharge : loi de dérivation, liens topologiques amont et aval.

- Retenue : coordonnées du barrage, relation niveau-volume.
- Evacuateur de crue : relation niveau-débit.
- Ouvrage de vidange : relation niveau-débit.
- Turbine : coordonnées de la centrale, capacité de turbinage, liens topologiques amont et aval.

Discrétisation du bassin versant

La discrétisation du bassin versant du Rhône à l'amont du Léman a été réalisée en tenant compte de quelques contraintes. Premièrement, il était nécessaire d'avoir des sous-bassins versants dont les exutoires correspondent avec les prises d'eau les plus importantes (capacité minimale de $1 \text{ m}^3/\text{s}$). Deuxièmement, la surface minimale des sous-bassins versants devait être d'environ 10 km^2 afin de limiter les incertitudes liées au concept du modèle hydrologique. Troisièmement, il fallait respecter la réalité hydrographique du terrain tout en choisissant des zones morphologiquement homogènes. Enfin, ces sous-bassins devaient être divisés en bandes d'altitude glaciaires et non-glaciaires de 500 m environ.

Les 5521 km^2 du bassin versant ont donc été divisés en 239 sous-bassins versants (surface moyenne : 23 km^2) pour 1050 bandes d'altitude (surface moyenne : 5.25 km^2), dont 196 bandes glaciaires. Pour effectuer le lien hydraulique entre ces unités hydrologiques, 140 tronçons de cours d'eau ont été considérés. La figure 4.1 illustre le bassin versant du Rhône, son relief et le découpage en sous-bassins versants et tronçons de cours d'eau retenu.

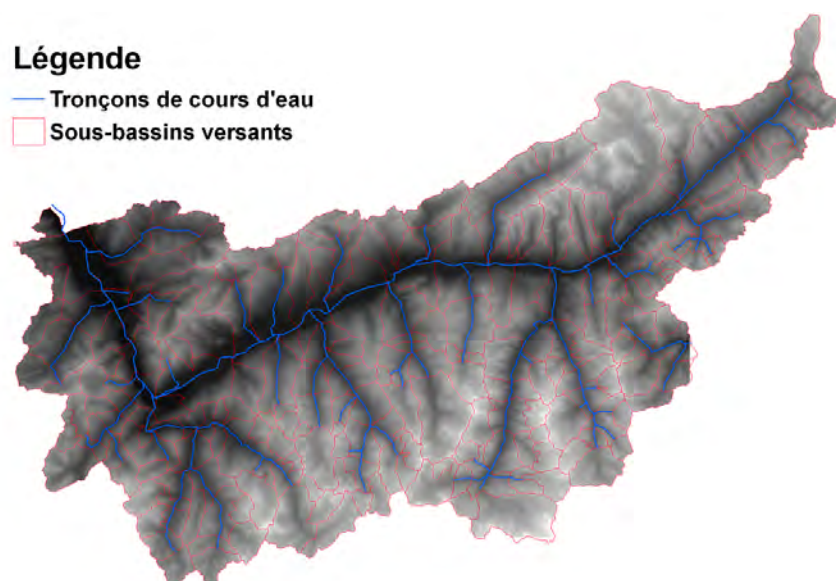


Figure 4.1 : Le bassin versant du Rhône, ses 239 sous-bassins et 140 tronçons de cours d'eau

Paramètres géomorphologiques

L'extraction des surfaces, altitudes moyennes et pentes moyennes des sous-bassins versants a été effectuée par traitement SIG du modèle numérique de terrain à 25 m de Swisstopo¹ (MNT25) en fonction des polygones des sous-bassins versants. Les coordonnées des centres de gravité des sous-bassins ont également été obtenues de cette manière, ainsi que les longueurs et pentes moyennes des tronçons de cours d'eau. Ces données ont été archivées dans LCH (2003).

La discrétisation en bandes d'altitude nécessite le repérage des surfaces et altitudes moyennes des bandes d'altitudes. Un outil *Matlab* appelé *GeoHydro* a été développé par Hamdi (2003) afin d'éviter un traitement trop fastidieux par SIG. Les données ont donc pu être extraites de la sorte pour paramétrer les modèles hydrologiques ainsi que les stations virtuelles. Il convient de noter que les stations virtuelles appliquées aux bandes d'altitude sont paramétrées par leurs coordonnées (x_s, y_s, z_s) . Les coordonnées en plan x_s et y_s retenues sont celles du sous-bassin parent, tandis que l'altitude z_s est différente pour chaque bande d'altitude.

Topologie du modèle et nomenclature

La topologie du modèle numérique est composée de deux systèmes d'échelle différente. Tout d'abord, le réseau hydrographique naturel est de type arborescent et sa topologie peut aisément être définie à partir d'un outil SIG. Des schémas-bulles ont été préalablement dessinés pour servir de schéma directeur lors de la construction du modèle *Routing System II*. La figure 4.2 montre la topologie du réseau hydrographique naturel de la Grande-Eau et de l'Avançon ainsi représentée.

¹ Office fédéral de topographie, Seftigenstrasse 264, Case postale, 3084 Wabern.
info@swisstopo.ch

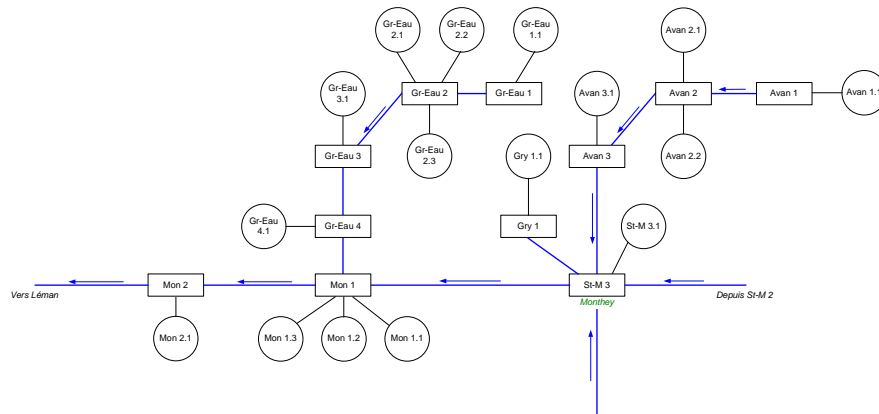


Figure 4.2 : Schéma-bulles de la région Bas-Valais de Monthey au Léman. Rectangles: jonctions ; Cercles : sous-bassins versants ; traits bleus : tronçons de cours d'eau.

Le réseau artificiel comprend les prises d'eau en rivière, les collecteurs, les retenues, les galeries et conduites et enfin les turbines avec leur ouvrage de restitution. Ce réseau parfois bouclé se superpose au réseau hydrographique naturel sans être systématiquement effectif, car le fonctionnement correct des ouvrages est soumis à certaines variations opérationnelles ou accidentelles. La topologie de l'aménagement de Salanfe superposée au réseau hydrographique naturel est présentée à la figure 4.3.

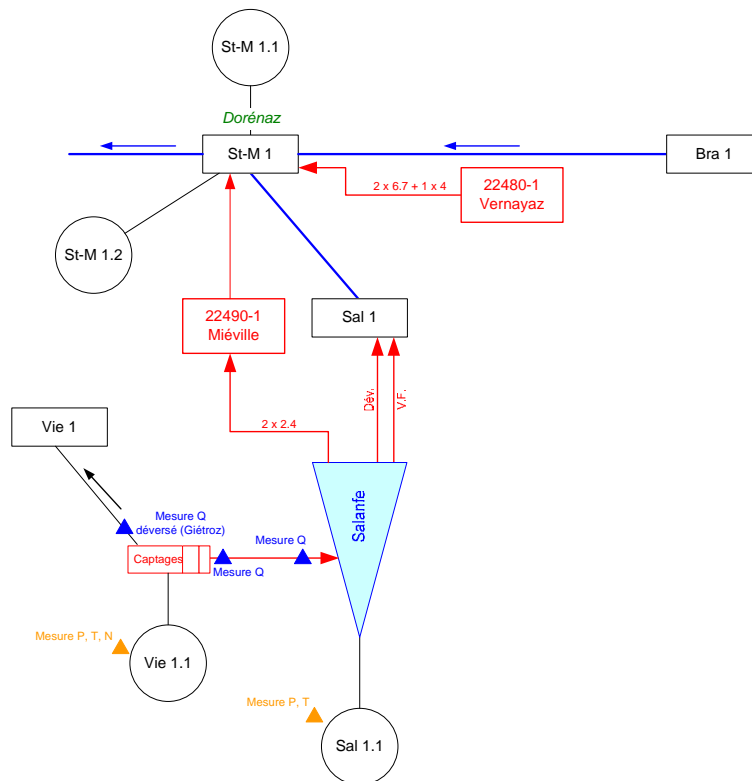


Figure 4.3 : Topologie de l'aménagement de Salanfe.

Cette étape de définition de la topologie a également été l'occasion de déterminer la nomenclature des objets hydrologiques. Le bassin versant a été découpé en régions fournissant les préfixes : *Reck* pour la région Reckingen, *Visp* pour la région Vispa, *Vie* pour la Vièze, etc... La numérotation a ensuite été déterminée de l'amont vers l'aval avec un système à deux nombres. Les jonctions ont d'abord été numérotées (*Avan 1*, *Avan 2*, ...). Ensuite, les sous-bassins versants ont été nommés du même nom que la jonction située juste à l'aval (*Avan 1.1*, *Avan 1.2*, *Avan 2.1*, etc...). Les tronçons ont simplement été nommés par concaténation des noms des jonctions qu'ils relient (*Avan 1 Avan 2*, *Avan 3 St-M 3*, etc...).

Construction du modèle dans *Routing System II*

Routing System II offre la possibilité de construire des sous-modèles qui peuvent être imbriqués les uns dans les autres, ou encore assemblés en parallèle ou en série. Cette fonctionnalité a donc été exploitée et le modèle numérique a lui aussi été découpé en régions. Le schéma complet du découpage à haut niveau du modèle numérique est présenté à la figure 4.4. Il y a en tout 17 régions découpées, contenant 10 grandes retenues alpines et 15 bassins de compensation.

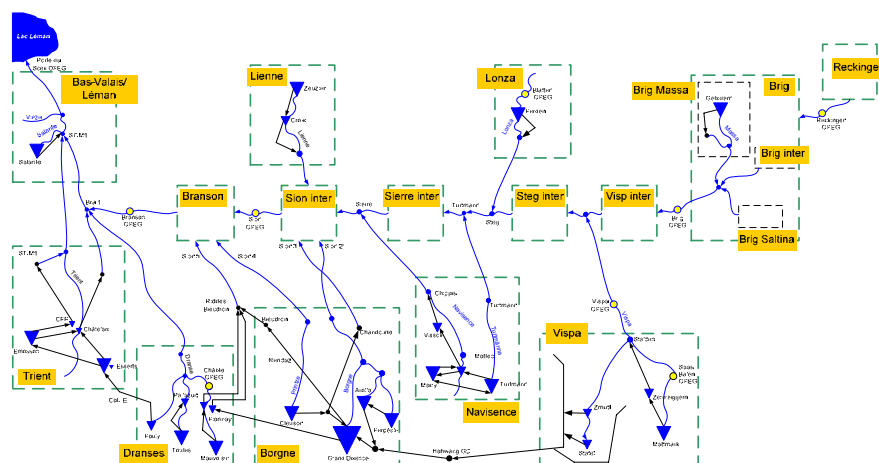


Figure 4.4 : Topologie à haut niveau du modèle numérique *Routing System II*.

La figure 4.5 illustre le modèle RSII correspondant à ce schéma. Les régions sont nommées, tout comme les jonctions permettant de visualiser les résultats rapidement sans changer de niveau hiérarchique.

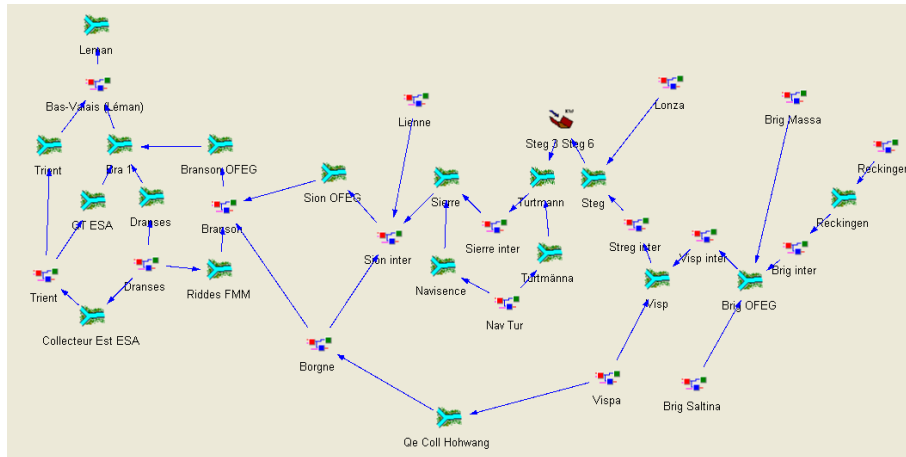


Figure 4.5 : Vue à haut niveau du modèle du Rhône.

Sur un zoom de la région de la Vispa (figure 4.6), il est possible de distinguer les différents objets hydrologiques et hydrauliques ainsi que leurs liens topologiques. Ainsi, les sous-bassins versants, les jonctions, les dérivations, les retenues, les évacuateurs, les turbines et les cours d'eau sont aisément reconnaissables. Sur la figure se trouve également un objet effectuant un lien avec la BD.

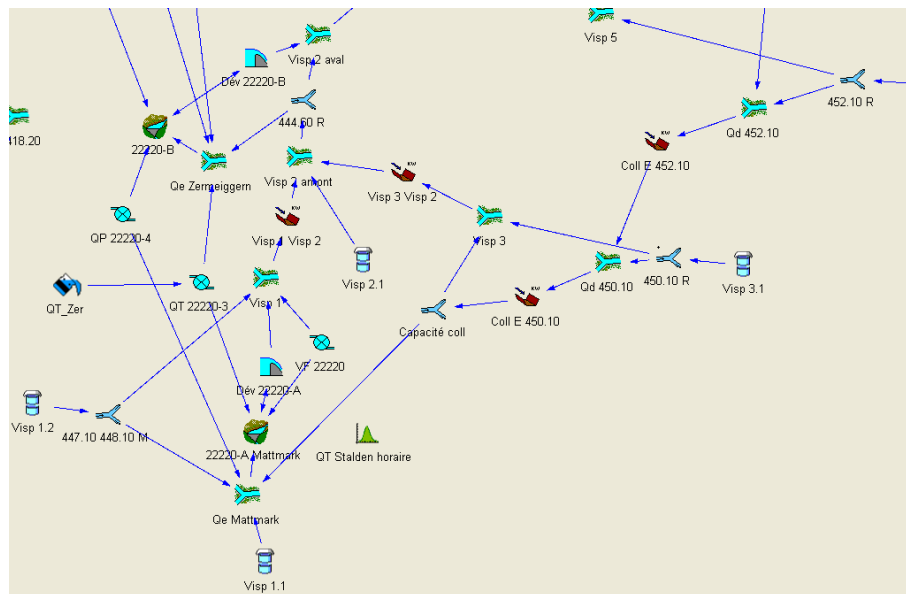


Figure 4.6 : Vue d'une partie de la région Vispa dans le modèle, avec les liens entre les différents objets : sous-bassin versant, jonction, retenue, turbine, dérivation, transfert et évacuateur.

Enfin, il est intéressant de découvrir la structure d'un sous-bassin versant à l'exemple de celui du glacier d'Aletsch (Brig 8.1) présenté à la figure 4.7.

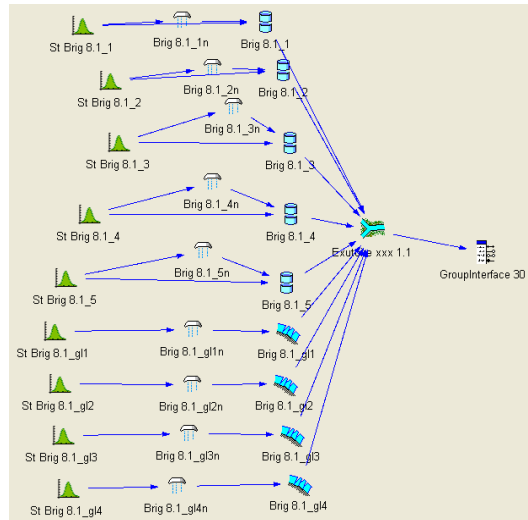


Figure 4.7 : Vue du sous-bassin versant *Brig 8.1* avec ses 9 stations virtuelles, ses 9 modèles de neige, ses 5 bandes d'altitude non-glaciaires et ses 4 bandes glaciaires. La somme de ces contributions est effectuée par la jonction, puis transmise à l'interface.

Les 9 bandes d'altitude constituant ce bassin versants sont alimentées à partir de la BD grâce aux stations virtuelles (ex. *St Brig 8.1_1*) qui transmettent les variables météorologiques aux modèles de neige (ex. *Brig 8.1n*). La pluie équivalente produite est fournie soit au réservoir-sol (ex. *Brig 8.1_1*), soit au modèle de glacier (ex. *Brig 8.1_gl1*).

Le modèle *Routing System II* est donc entièrement construit selon la hiérarchisation et la nomenclature présentées dans ce paragraphe. Le concept de modélisation permet une grande flexibilité, dans la mesure où un ouvrage peut facilement être ajouté ou supprimé, de même qu'un sous-bassin versant ou n'importe quel objet hydrologique ou hydraulique.

Calage et validation du modèle hydrologique

Le calage et la validation du modèle hydrologique ont été effectués en exploitant le maximum de données disponibles afin de réduire l'incertitude de modélisation. Les informations utilisées sont les suivantes:

- Données de commande : mesures horaires de précipitation et de température (réseaux ANETZ , IMIS ou privés)
- Données de contrôle : mesures horaires ou journalières de débit (réseaux OFEG² ou privés)
- Paramètres de turbinage ou de pompage : production horaire ou journalière (privés ou reconstitués)

Pour des raisons informatiques, il était impossible de réaliser des simulations continues d'une durée supérieure à 15 mois. Le calage et la validation ont donc été réalisés sur des périodes pendant lesquelles des événements de crue s'étaient produits, cela afin de vérifier la capacité du modèle hydrologique à reproduire ces phénomènes en simulation continue :

- Calage : 01.10.1999 - 31.12.2000
- Validation : 01.10.1986 - 31.12.1987
 01.10.1992 - 31.12.1993
 01.10.1993 - 31.12.1994

Paramètres de calage

Le modèle hydrologique GSM-SOCONT se compose de 4 modèles différents pour 7 réservoirs. La liste exhaustive des paramètres potentiels de calage est présentée au tableau 5.1.

² OFEG : Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, dissout le 31 décembre 2005. Actuellement, la section hydrologie est à l'OFEV : Office Fédéral de l'Environnement.

Tableau 5.1 : Description des paramètres potentiels de calage du modèle hydrologique.

modèle	par.	unité	description
Neige	A_N	m/°C/s	facteur degré-jour de la neige
	θ_{cr}	-	teneur en eau critique de la neige
	K_f	-	constante de vidange du réservoir d'eau dans la neige
	T_{cp1}	°C	température inférieure de séparation pluie-neige
	T_{cp2}	°C	température supérieure de séparation pluie-neige
	T_{cr}	°C	température critique de fusion de la neige
	b_p	s/m	facteur d'augmentation de fonte lors de pluies
RN	K_N	1/s	constante de vidange du réservoir linéaire de neige
RGL	K_{GL}	1/s	constante de vidange du réservoir linéaire de glace
Glace	A_{GL}	m/°C/s	facteur degré-jour de la glace
GR3	h_{max}	m	capacité de rétention du réservoir GR3
	k	1/s	constante de vidange du réservoir-sol
SWMM	K_s	m ^{1/3} /s	coefficient de Strickler

Le tableau 5.2 présente la liste des autres paramètres à fournir au modèle hydrologique, qui ne font pas l'objet d'un calage mais qui doivent être mesurés ou obtenus à partir d'une analyse sur système d'information géographique (GIS).

Tableau 5.2 : Liste des paramètres géomorphologiques constants.

modèle	paramètre	unité	description
Glace	S_{GL}	m ²	surface de la bande glaciaire
GR3	S	m ²	surface de la bande non-glaciaire
SWMM	B	m	largeur moyenne du plan incliné
	J_0	-	pente moyenne du plan incliné

Il est évident qu'une analyse exhaustive des jeux de paramètres est impossible, ne serait-ce que pour 1 sous-bassin versant, car une bande glaciaire contient 10 paramètres de calage et une bande non-glaciaire en contient également 10. Il est d'autant plus difficile de tester toutes les combinaisons pour une multitude de bandes d'altitude. Des analyses ont été effectuées afin de choisir des valeurs constantes pour certains paramètres et ainsi réduire la taille du jeu de paramètres à caler (Hamdi et al., 2003). Sur cette base, 6 paramètres issus du modèle de fonte de neige ont été fixés et les valeurs choisies sont présentées dans le tableau 5.3. Il reste donc pour chaque bande d'altitude glaciaire et non-glaciaire un jeu de 4 paramètres à caler.

Tableau 5.3 : Liste des paramètres de calage fixés à une valeur constante.

paramètre	unité	Valeur
θ_{cr}	-	0.1
K_f	-	1
T_{cp1}	°C	0
T_{cp2}	°C	2
T_{cr}	°C	0
b_p	s/m	$1.08 \cdot 10^6$

Données de commande et de contrôle

Les données de commande sont les mesures de précipitations et températures aux stations ANETZ, IMIS et privées. Le réseau utilisé se compose de 80 stations fournissant des mesures horaires ou journalières. Les données journalières ont été désagrégées en données horaires (Hingray et al, 2006) pour fournir une base de données homogène. Les stations utilisées sont présentées à la figure 4.8.

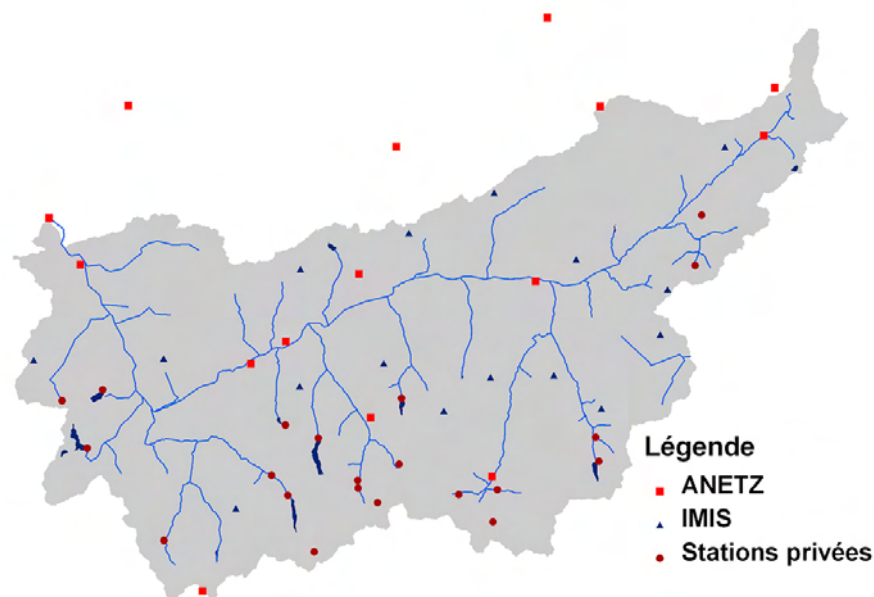


Figure 4.8 : Carte des stations de mesure météorologiques utilisées pour le calage et la validation du modèle hydrologique.

Les données de contrôle sont les mesures de débit aux stations OFEG et aux prises d'eau équipées. Lorsque les mesures horaires n'étaient pas disponibles, le calage a été réalisé sur une base journalière (certaines données privées). En tout 103 sources de mesure de débit ont été utilisées, certaines d'entre elles ayant été agrégées pour le calage d'un sous-bassin versant. Les données utilisées et leurs sous-

bassins versants associés sont présentés à la figure 4.9. De nombreux sous-bassins versants non aménagés se trouvent à l'amont de prises d'eau avec une forte composante glaciaire. Les stations de mesure situées le long du Rhône permettent le calage de sous-bassins versants dont l'écoulement est perturbé par la production hydroélectrique.

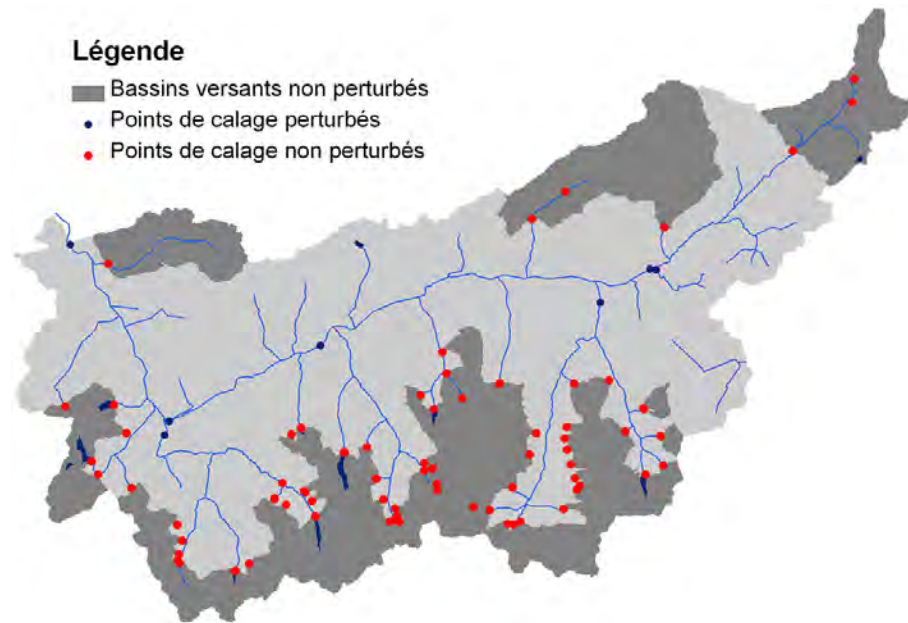


Figure 4.9 : Carte des sous-bassins versants non perturbés, avec leurs points de calage (stations de mesure de débit).

Paramétrage de la production hydroélectrique

Le calage des sous-bassins versants situés à l'aval des aménagements hydroélectriques est délicat pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la surface à considérer à l'amont d'une station de mesure de débit est environ 10 fois plus grande que celle des sous-bassins non perturbés, ce qui augmente fortement l'incertitude sur les paramètres hydrologiques. Ensuite, le régime hydrologique nival typique de ces sous-bassins est délicat à reproduire, car il n'y a pas de glacier pour ajuster le bilan en eau et amortir le signal hydraulique. La réactivité de ces sous-bassins est importante à cause des fortes pentes situées sur les flancs boisés des vallées compris entre 600 et 2000 mètres d'altitude. Les sous-bassins de plaine sont insignifiants pour la production du débit de crue et il est par conséquent extrêmement difficile de les isoler. Enfin, les stations de mesure utilisées pour le calage de ces sous-bassins versants sont situées par définition à l'aval des aménagements hydroélectriques. Il est donc aisé de soustraire les débits captés. Il est par contre beaucoup plus difficile d'ajouter les rejets de turbines. Ces derniers ont été estimés en fonction de la qualité des mesures disponibles selon les méthodes suivantes :

- **Mesures horaires disponibles toute l'année**
Centrale de Nendaz (Grande Dixence)
Utilisation directe des mesures.
- **Mesures journalières disponibles toute l'année**
Centrales de Stalden (Mattmark), Mottec-Vissoie-Chippis (Moiry), Riddes (Mauvoisin), Vallorcine-La Bâtiaz (Emosson)
Désagrégation des valeurs journalières en valeurs horaires. Bilan journalier, début du turbinage en continu dès 7h, si nécessaire réduction du débit horaire turbiné pour garantir une durée minimale de turbinage de 2 heures.
- **Pas de mesures de débit turbiné disponibles**
Centrales de Bitsch (3 mois horaires disponibles), St-Léonard (Lienne), Steg (Lötschen), Chandoline-Cleuson (Dixence, 3 mois horaires disponibles), Pallazuit (3 mois horaires disponibles), Miéville (Salanfe, 3 mois horaires disponibles)
Modélisation du débit entrant (calage selon niveau de la retenue). Simulation du cycle annuel du niveau de la retenue en ajustant une série de débits turbinés selon horaire type.

Afin de localiser au mieux les erreurs de modèle, les mesures ont été utilisées partout où elles étaient disponibles. Par exemple, pour le calage des sous-bassins versant situés entre Reckingen et Brigue, le débit mesuré à Reckingen a été introduit dans le modèle hydrologique et le calage a été effectué grâce à la comparaison entre mesures et simulations à Brigue. Le calage des sous-bassins versants entre Brigue et Sion a été effectué en introduisant les mesures à Brigue (Rhône), Viège (Viège) et Blatten (Lonza). Cette procédure a été poursuivie jusqu'au Léman (figure 4.10).



Figure 4.10 : Points de calage à l'exutoire de sous-bassins versants aménagés et rejets des aménagements hydroélectriques.

Procédure de calage

La procédure de calage n'a pas pu être automatisée en raison du grand nombre de combinaisons de paramètres possibles. Une procédure manuelle a donc été suivie, qui tire parti du comportement typique du modèle hydrologique GSM-SOCONT. L'ordre d'ajustement des paramètres respecte la logique suivante : d'abord garantir le bilan en été (fonte de glace), puis au printemps (fonte de neige), avant d'ajuster le bilan annuel (infiltration) et enfin la nervosité du modèle (écoulement rapide). Les processus hydrologiques modélisés étant en général bien distincts dans le temps, il a été possible de déterminer les valeurs optimales des paramètres séparément, les paramètres étant ajustés les uns après les autres. L'ordre d'ajustement était le suivant :

- a) A_{GL} (glacier)
- b) K_{GL} (glacier)
- c) K_N (glacier)
- d) A_N (neige)
- e) h_{max} (sol : infiltration)
- f) k (sol : infiltration)
- g) K_s (sol : écoulement rapide)

Performance du calage et de la validation

La performance du modèle hydrologique a été évaluée selon deux critères : le rapport du bilan annuel de volume (5.1) et le critère de Nash (5.2).

$$Bilan = \frac{V_{sim}}{V_{obs}} \quad (5.1)$$

$$Nash = 1 - \frac{(Q_{sim} - Q_{obs})^2}{(Q_{obs} - Q_{obs})^2} \quad (5.2)$$

Le bilan de volume doit s'approcher de 1 pour être optimal. Le critère de Nash varie de $-\infty$ à 1 (valeur optimale). Une simulation dont le critère de Nash vaut 0 équivaut à simuler un débit constant égal au débit observé moyen tout au long de l'année.

L'évaluation n'a pas uniquement été effectuée selon ces deux critères, mais la correspondance avec les processus modélisés a également été considérée. En réalité, un paramétrage mou des modèles de neige et de glace fournit les meilleures performances selon les indicateurs de bilan et de Nash, mais ne permet pas de reproduire le cycle de fonte journalier. Un paramétrage plus nerveux a donc été choisi qui, malgré

une perte de performance selon le critère de Nash, permet de mieux représenter cet aspect essentiel de la production de débit.

Sous-bassins versants non aménagés

Pour les 32 sous-bassins versants non aménagés considérés, le coefficient de Nash moyen est de 0.64 pour un écart-type de 0.11. Le rapport de bilan moyen est de 1.03 pour un écart-type de 0.15. Les paramètres de calages trouvés sont présentés au tableau 5.4.

Les performances en validation sont similaires : le coefficient de Nash moyen est de 0.66 pour un écart-type de 0.19. Le rapport de bilan moyen est de 1.11 pour un écart-type de 0.34. Ces résultats confirment la robustesse du modèle hydrologique. Les résultats de la validation des sous-bassins non aménagés sont représentés sous forme graphique à la figure 4.11.

Tableau 5.4 : Synthèse des paramètres de calage et performances des sous-bassins non aménagés.

Nom sous-bassin	Nash	Bilan	A_{GL} mm/ °C/j	K_{GL} 1/s	K_N 1/s	A_N mm/°C/j	H_{max} m	k 1/s	K_s m ^{1/3} /s
Alphubel	0.61	0.91	4	0.25	0.25	5	0.8	0.00500	0.5
Arb	0.65	0.99	6.5	0.5	0.5	7	2	0.00150	2
Arolla	0.62	0.99	1	0.5	0.2	5.3	1.2	0.00010	0.5
Bertol	0.60	0.96	12	0.4	0.63	6	1.2	0.00200	1
Lonza	0.64	1.04	7	0.4	0.4	10	0.5	0.00030	0.2
Chennaz	0.62	1.17	6	0.35	0.35	4	1.2	0.00100	1
Coll. Est	0.74	1.04	4	0.6	0.6	5.5	0.8	0.00020	0.2
Coll. Ouest	0.60	1.02	3	0.6	0.6	4	0.8	0.00015	0.2
Dt Blanche	0.64	1.10	1.8	0.2	0.2	4	1.2	0.00015	2
Edelweiss	0.65	0.97	9	0.7	0.7	9.5	1.2	0.00020	0.5
Ferpècle	0.59	1.07	8	0.24	0.24	5.8	0.8	0.00005	0.2
Festi	0.65	1.02	3	0.1	0.1	5.9	0.4	0.00010	0.2
Findelen	0.66	0.99	6	0.2	0.4	5	1.2	0.00050	1
Fontanesses	0.51	0.97	8	4	3	12	1.4	0.00005	1
Furgg	0.57	0.95	6	0.5	0.5	6	1.2	0.00100	0.5
Gletsch	0.81	0.96	5.5	0.73	0.73	4.2	1.5	0.00010	0.2
Goneri	0.43	1.24	0.5	4	2	7	0.9	0.00025	0.14
Gornera	0.61	0.82	15	0.63	0.63	3	0.2	0.00040	0.2
Massa	0.72	0.90	5	0.63	0.63	5	0.8	0.00150	1
Mattmark	0.76	0.93	9	0.8	0.8	5	1.1	0.00015	0.5
Mauvoisin	0.70	0.96	3.2	0.35	0.35	5.6	0.9	0.00015	2
Moiry	0.75	1.03	6	0.5	0.5	5.5	0.8	0.00015	0.2
Mottec	0.59	1.05	2	0.54	0.54	4	0.25	0.00040	0.1
Reckingen	0.72	0.95	5	1	1	6	0.25	0.00040	0.1
Stafel	0.30	1.05	5	2	2	5	1.2	0.00015	0.2
Triège	0.83	1.07	6	0.25	0.25	4.5	1.4	0.00020	0.6
Trift	0.71	0.90	5	0.63	0.63	5	0.3	0.00150	0.2
Turtmann	0.49	1.01	4	0.6	0.6	6	0.8	0.00025	0.2
Vouasson	0.68	0.96	10	1	1	12	1.2	0.00150	1
Vuibe	0.77	0.99	4	0.38	0.38	4	0.25	0.00050	0.1

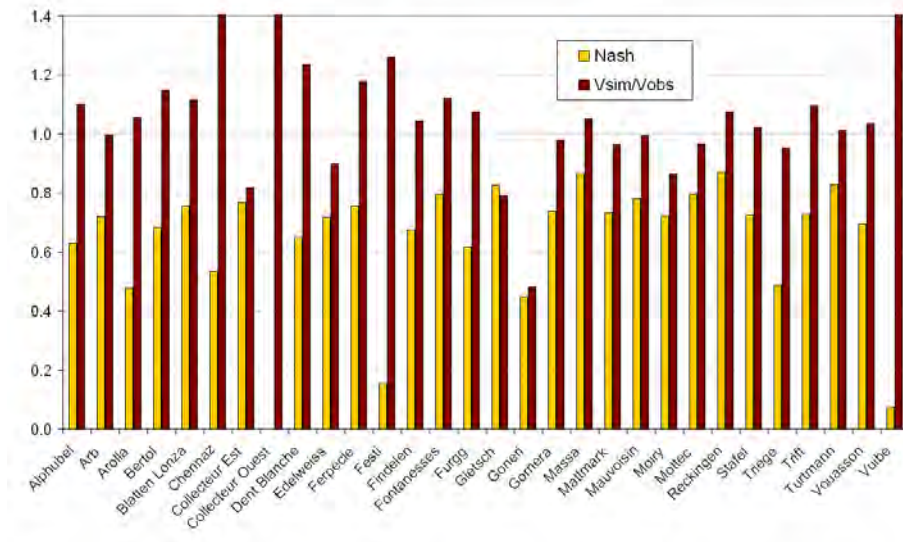


Figure 4.11 : Synthèse des résultats de validation des sous-bassins non aménagés.

Quelques hydrogrammes sont présentés à la figure 4.12, où les simulations des sous-bassins versants de Gletsch et Massa sont comparées aux valeurs observées pour l'année 2000 (calage) et 1993 (validation). Le cycle hydrologique annuel est bien reproduit, avec une période de constitution des stocks de neige en hiver de novembre à avril, la fonte de neige d'avril à juin, puis la fonte glaciaire jusqu'en septembre et enfin l'automne et ses crues caractéristiques.

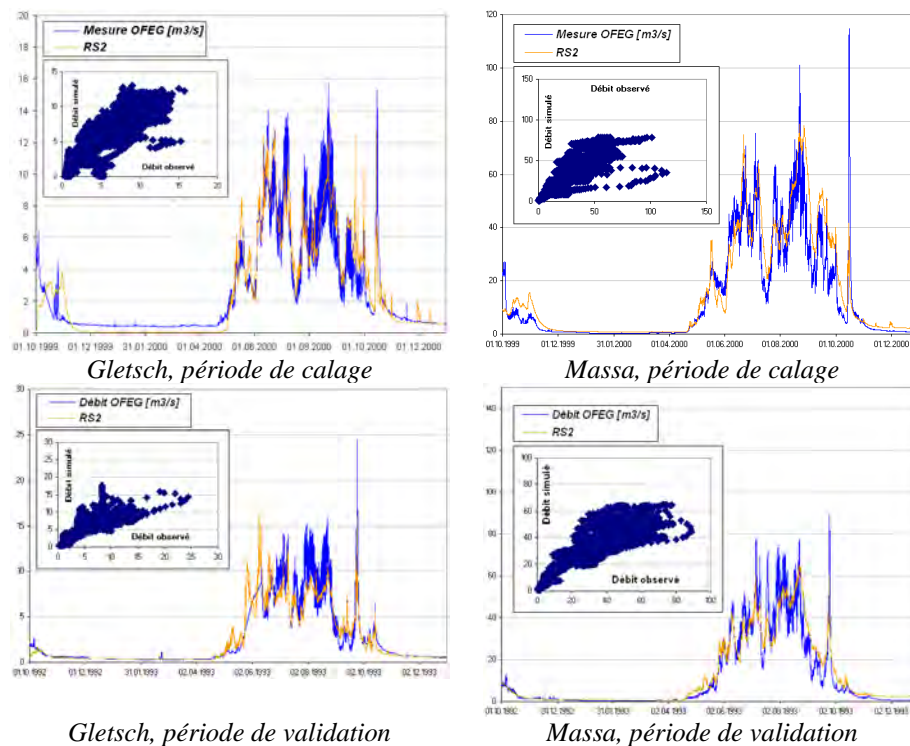


Figure 4.12 : Exemples d'hydrogrammes observés et simulés sur des sous-bassins versants non aménagés. En haut: période de calage. En bas: période de validation.

Les performances du modèle hydrologique en validation sont donc en général similaires à celles obtenues en calage, à l'exception de quelques sous-bassins dont les résultats sont particulièrement mauvais (Festi, Vuibe). Une forte surestimation des volumes ruisselés est également observée sur ces sous-bassins. Il convient de rappeler que de nombreuses stations météorologiques (les stations IMIS) n'étaient pas encore disponibles lors de la période de calage, ce qui peut expliquer une partie de la dégradation des performances en validation. Toutefois, le nombre de stations de mesures installées sur le bassin versant du Rhône augmentant au fil des années, les performances sur ces sous-bassins devraient être revues au niveau du calage.

Les principaux enseignements tirés des procédures de calage et de validation sont les suivants : le bilan de volume annuel peut être ajusté grâce au paramètre de fonte de glace. Ce dernier permet de compenser l'évapotranspiration réelle (ETR) qui n'a pas été considérée dans ce travail. L'ETR produit une perte de volume d'eau lors des pluies. Cependant, cette perte est négligeable en hiver (neige) et l'ETR n'intervient pas dans les processus de fonte de neige et de glace, ni ou faiblement pendant les crues, lorsque l'atmosphère est saturée en humidité. Il est toutefois envisageable de l'intégrer au modèle lors de développements futurs, moyennant une vérification du calage. Les phénomènes les moins bien modélisés sont la fonte de neige au printemps (en volume) qui dépend fortement du stock de neige constitué lors de l'hiver. Or, ce dernier est difficile à évaluer car les stations de mesure de précipitations sont peu nombreuses en moyenne altitude. Enfin, les crues d'automne sont parfois sous-évaluées. Cela provient du manque de stations de mesure sur la crête principale des Alpes où les fortes précipitations sont concentrées lors de ces événements et où l'estimation du gradient de température est déterminante pour la précision des résultats.

Sous-bassins versants aménagés

Les performances du modèle hydrologique sur les sous-bassins versants aménagés sont naturellement moindres que sur les sous-bassins non aménagés. 13 points de calage et de validation sont présentés à la figure 4.13. Les coefficients de Nash négatifs ne sont pas visibles sur la figure et n'ont pas été considérés dans le calcul de la valeur moyenne. En calage, le Nash moyen vaut 0.58 pour un écart-type de 0.20, tandis qu'en validation, il est de 0.63 pour un écart-type de 0.27. Le modèle est donc toujours aussi robuste puisque les performances en validation ne sont pas inférieures à celles du calage. Il convient toutefois de relever que certains sous-bassins versants ont de très mauvaises performances et devront faire l'objet de travaux complémentaires (Fionnay, Vissoie, Dranses, Saas Balen). Ces sous-bassins nécessitent en effet une analyse hydrologique détaillée menant éventuellement à des modifications structurelles du modèle.

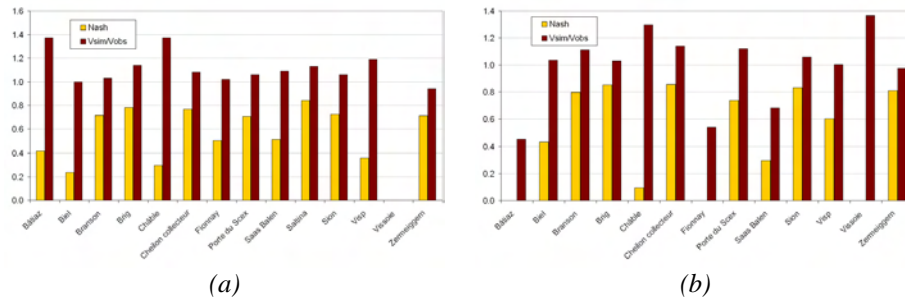


Figure 4.13 : Synthèse du calage et de la validation des sous-bassins versants aménagés.

Les résultats des simulations présentés à la figure 4.14 montrent que le modèle est parfaitement capable de reproduire le cycle hydrologique annuel sur le bassin versant du Rhône. La période hivernale est correctement modélisée, malgré quelques différences d'amplitude des débits provenant des centrales hydroélectriques. La fonte de neige au printemps (mars-mai) est sous-estimée lors du calage (année 2000) mais bien reproduite en validation (année 1993). L'apparition des grands événements de crue (septembre 1993 et octobre 2000) est également bien reproduite. Il convient de rappeler que pour l'établissement de ces résultats aucune modification du modèle n'a été effectuée depuis le lancement du calcul le 1^{er} octobre de l'année précédente. Ce sont bien les précipitations, les températures et les niveaux dans les différents réservoirs du modèle hydrologique qui produisent les hydrogrammes de crue.

La crue d'octobre 2000 est modélisée en phase jusqu'à Branson. A Sion, la crue simulée ressemble à la crue observée : la différence de débit est de 3 m³/s sur 900 m³/s et les pointes sont en phase (figure 4.15a). A la Porte du Scex, la différence est plus importante et atteint 200 m³/s (figure 4.15b). De plus, la crue simulée est produite avec un retard de 4 heures. Ces différences proviennent essentiellement de la région des Dranses pour laquelle le modèle n'a pas produit une crue comparable à celle observée. En outre, l'effet de rétention dû aux inondations en plaine n'est pas modélisé.

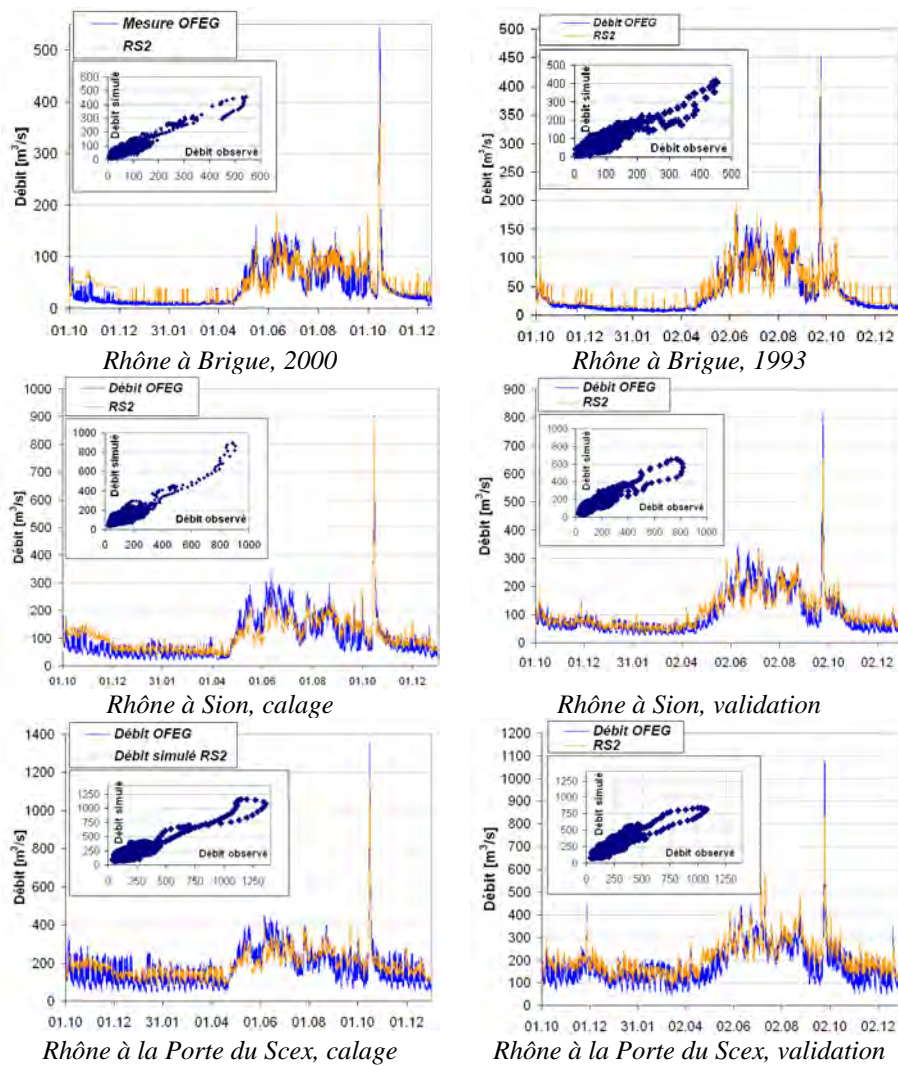


Figure 4.14 : Comparaison entre observations et simulations en différents points de calage situés le long du Rhône. Gauche: calage (2000). Droite: validation (1993).

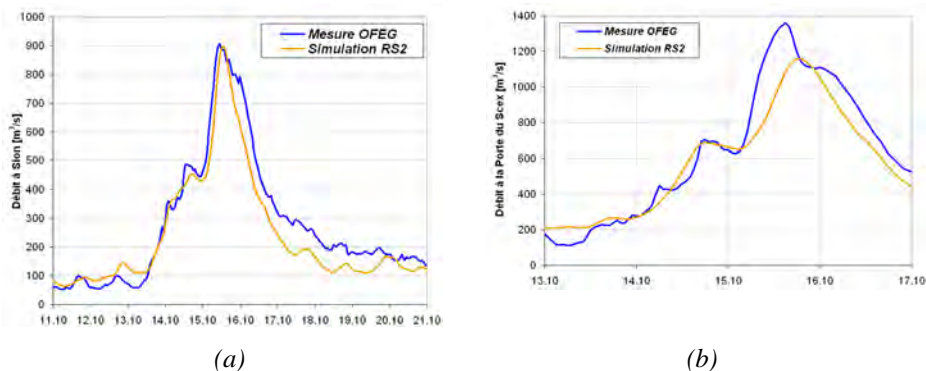


Figure 4.15 : Comparaison entre observations et simulations de la crue d'octobre 2000. a) Sion et b) Porte du Scex.

Commentaires

L'analyse des résultats des procédures de calage et de validation des modèles montre la robustesse du concept de modélisation choisi. Le modèle a été validé sur les années 1987, 1993 et 1994 avec des résultats satisfaisants. Il peut donc être utilisé tel quel, même si des erreurs modèle de l'ordre de 25% sont à prévoir. Le comportement des aménagements hydroélectriques est également contrôlé avec une précision acceptable. Les résultats fournis sont généralement fiables sur l'ensemble du bassin versant du Rhône, mais ils peuvent parfois être de qualité moyenne dans certaines régions, en particulier dans la région des Dranses et de la Viège à Saas Balen.

Une procédure de mise à jour des variables d'état a été développée pour pallier ces problèmes et augmenter la performance de modélisation pure en ajustant les résultats du modèle hydrologique sur les mesures. Cette procédure n'a pas été décrite en détail dans ce chapitre, mais est traitée au chapitre suivant. Il faut toutefois se souvenir qu'en mode prévision l'incertitude sur l'hydrogramme de crue (phase et amplitude) sera fortement augmentée sans possibilité de contrôle à plus de 12 heures en avance. En effet, ce délai correspond au temps de réponse du bassin versant (à l'aval de Sion) et les mesures de précipitations et températures contrôleront prioritairement le modèle. Passé ce délai, l'information hydrologique provenant des mesures sera inutilisable et seules les prévisions contrôleront le modèle.

Chapitre 5

Prévision hydrologique

Pour effectuer une prévision hydrologique, l'outil Minerve doit effectuer plusieurs opérations. Il s'agit tout d'abord de récupérer et d'adapter les prévisions météorologiques, puis de définir les conditions initiales du modèle hydrologique et enfin de lancer les simulations prévisionnelles. Minerve exploite actuellement les prévisions météorologiques fournies par MétéoSuisse et calculées à l'aide du modèle COSMO-CH7 de manière déterministe pour la prévision hydrologique.

Contenu

- Données brutes MétéoSuisse
- Spatialisation aux stations virtuelles Minerve
- Mise à jour du modèle hydrologique
- Prévision hydrologique en période de crue

Données brutes MétéoSuisse

MétéoSuisse est le service national chargé de fournir des prévisions météorologiques opérationnelles à la population. Pour ce faire, il dispose d'un réseau de mesures couvrant l'ensemble du territoire, d'autres sources de données telles qu'images radar, ballons-sondes et images satellites contribuent à l'évaluation de la situation. De plus, MétéoSuisse s'appuie sur son modèle numérique COSMO-CH7 qui calcule l'évolution probable des variables météorologiques et permet l'établissement de prévisions météorologiques quantitatives.

Dans le cadre du projet Minerve, les prévisions météorologiques sont fournies sur une grille régulière autour du bassin versant du Rhône à l'amont du lac Léman (figure 5.1). Tous les points forment une maille de 7km×7km (points rouges). Sur cette figure sont également représentées les stations virtuelles Minerve (points noirs), qui correspondent aux centres de gravité des sous-bassins versants du modèle hydrologique. La grille MétéoSuisse est fixe et contient les 513 points sélectionnés pour le projet Minerve.

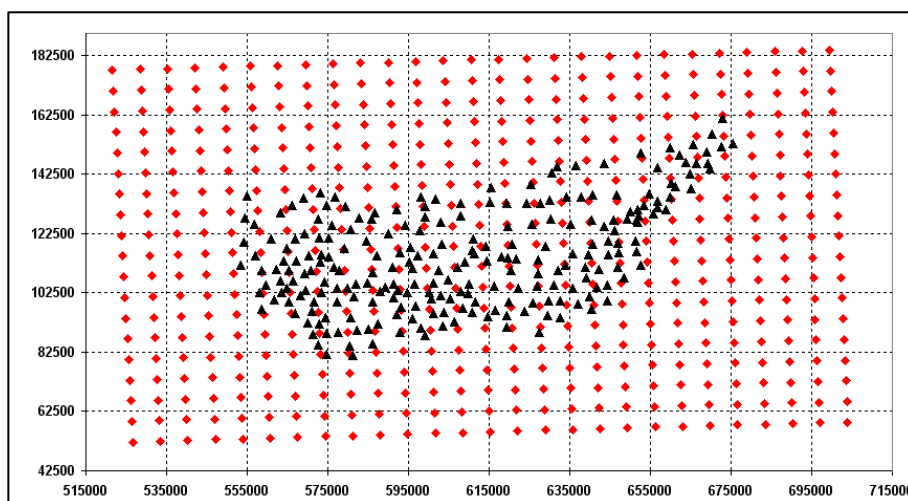


Figure 5.1 : Représentation des points COSMO-CH7 (losanges rouges) et des stations virtuelles Minerve (triangles noirs)

La topographie du modèle COSMO-CH7 n'est pas identique à la topographie réelle, et toutes deux sont elles-mêmes différentes de la topographie Minerve. La topographie COSMO-CH7 est basée sur un modèle numérique de terrain filtré. Par conséquent, les altitudes correspondant aux variables météorologiques calculées sont toujours relatives à la topographie filtrée COSMO-CH7, mais les valeurs finales doivent être rapportées à la topographie Minerve.

Les variables principales fournies par le modèle météorologique COSMO-CH7 sont en premier lieu liées à la précipitation. Quelle que

soit la forme de la précipitation, liquide ou solide, la quantité d’eau tomb e durant chaque heure est fournie et s’exprime en fonction de son intensité (mm/h). Sur les fichiers fournis par le modèle numérique se trouvent également les variables relatives à la température, qui est mesur e en degrés Kelvin (K)   différentes altitudes ; la vitesse du vent selon plusieurs directions (m/s)   l’altitude des niveaux de pression (m), la limite des chutes de neige (m), l’humidité relative (%) et la hauteur de neige (cm).

Un fichier de résultats provenant du modèle COSMO-CH7 est fourni toutes les 12 heures (  00.00 h et   12.00 h). Dans le fichier se trouvent les prévisions à un horizon de 72 heures (73 prévisions en incluant l’heure 0)   pas de temps d’une heure, pour les 22 variables météorologiques sur les 513 points de grille, incluant les données de précipitation, température, neige, humidité et vent. Il faut ajouter que le temps du modèle est fourni en valeurs UTC, et que les résultats ne sont en réalité disponibles que dès l’heure 6. En effet, la durée nécessaire au calcul numérique est de plusieurs heures : la dernière prévision contient donc de l’information sur les 6 heures pass es et sur les 67 heures à venir.

La **précipitation** est fournie sous forme  mul e à deux variables : pluie convective et pluie advective, directement au sol (topographie COSMO-CH7).

La **température** est donn e   différentes altitudes, correspondant aux niveaux de pression atmosphérique de 850, 700 et 500 hPa. Elle est également fournie à 1000, 2000, 3000, 4000 et 5000 m s.m. et   2 et 30 m au-dessus du sol.

L’**altitude des niveaux de pression** (850, 700 et 500 hPa) est fournie heure par heure : il est donc possible de connaître l’altitude en m s.m.   laquelle est fournie chaque température.

L’**intensité du vent** est donn e aux altitudes correspondant aux pressions atmosphériques de 700 et 500 hPa selon les deux directions X et Y.

La **quantité de neige** au sol et la **limite des chutes de neige** sont également fournies, tout comme l’**humidité relative**.

Spatialisation aux stations virtuelles Minerve

La variabilité spatiale des données météorologiques a une grande importance. Elle dépend principalement du paramètre considéré, de la morphologie du territoire, de l’orographie, de la distance à la mer et de la zone climatique.

La spatialisation des variables météorologiques est l'opération consistant à fournir des valeurs à chaque bande d'altitude des sous-bassins versants du modèle hydrologique (  chaque centre de gravité de chaque bande d'altitude, ou station virtuelle Minerve).

Sur le bassin versant du Rhône, 239 sous-bassins versants ont été créés avec leurs coordonnées X, Y, Z d termin es. Chaque sous-bassin a été divisé en bandes d'altitude avec les mêmes coordonnées X, Y mais avec une coordonn e Z différente pour chaque bande d'altitude. Normalement, chacune de ces bandes représente une zone d'environ 500 mètres de dénivellation. Au total, il y a 1059 bandes d'altitude qui doivent être aliment es avec les meilleures prévisions possibles.

De toutes les données fournies par MétéoSuisse, seules les données de précipitation et de température sont actuellement exploitt es par le modèle *Routing System II* du Rhône. Les autres variables sont rapatri es et archiv es mais ne sont pas directement exploitt es par le modèle hydrologique.

L'interpolation spatiale des variables hydro-météorologiques est une étape importante du processus de prévision hydrologique et doit se révéler robuste et non biais e. Les méthodes employ es dans le projet Minerve sont des méthodes déterministes simples, qui ont été choisies sur la base de nombreux tests.

Précipitations

La méthode de spatialisation des prévisions de précipitations choisie est la méthode de Shepard (Shepard, 1968). L'évaluation de la précipitation à une station virtuelle à partir de n points COSMO-CH7 situés dans les lieux $i=1,2,\dots,n$ peut être obtenue selon le carré de la distance euclidienne $d_{i,s}$ entre le point i et la station de calcul s , typiquement le centre de gravité d'un bassin versant.

Les données de précipitation sont fournies directement au sol, sur la topographie COSMO-CH7, et la spatialisation des précipitations est effectu e uniquement par interpolation en plan de la grille MétéoSuisse. Il s'agit donc d'un problème de répartition bidimensionnelle de variables. Les points de grille sont assimilés à des stations de mesures.

A la suite d'une analyse de performance, le nombre optimal de stations de mesure (ou points MétéoSuisse) a été défini à $n = 6$ où les stations

$i = 1,2,\dots,6$ sont les plus proches de s selon (6.1).

$$d_{i,s} = \sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2} \quad (6.1)$$

$$P_s = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{i,s}^2}} \quad (6.2)$$

avec x_i, y_i : position de la station i [m] ; x_s, y_s : position de la station s [m] ; P_s : précipitation à la station virtuelle [mm/h]; P_i : précipitation au point i COSMO-CH7 [mm/h] ; $d_{i,s}$: distance entre le point i COSMO-CH7 et la station virtuelle s [m].

Température

La méthode de spatialisation des prévisions de température doit fournir des valeurs au sol à partir de multiples valeurs dans l'atmosphère, fortement conditionn es par un gradient altimétrique variable. Cette méthode diffère de celle pr sent e pour la précipitation. Plusieurs données de température sont fournies par le modèle COSMO-CH7 en chaque point de grille et les altitudes relatives sont calcul es à partir du modèle numérique de terrain filtré COSMO-CH7. Seules les variables dont l'altitude est supérieure au niveau du sol du modèle numérique filtré sont consid r es.

La méthode employ e combine deux méthodes en fonction de la couverture neigeuse calcul e par le modèle météorologique, car celle-ci influence de manière significative la qualité de la température prévue. S'il n'y a pas de neige sur le point de grille, la température au sol peut être utilis e. Sinon, les températures aux altitudes supérieures sont exploitées et la température au sol est extrapol e par une fonction linéaire.

En premier lieu, les 4 points les plus proches de la station virtuelle à étudier sont choisis. Pour chacun d'eux une extrapolation différente est effectu e.

- Si $H_{N,i} \leq H_{N,\max}$: la couverture neigeuse au point i est inférieure à un seuil, fixé à 0.05 m, la température à la station, $T_{s,i}$ se calcule selon :

$$T_{s,i} = T_{2m,i} - \frac{dT_s}{dz} \cdot (z_{2m,i} - z_s) \quad (6.3)$$

avec $T_{s,i}$: température à la station virtuelle selon la station i ; $T_{2m,i}$: température au point i COSMO-CH7   2 m ; $z_{2m,i}$: altitude correspondant à la température à 2 m au point i ; z_s : altitude de la station virtuelle. Le gradient $\frac{dT_s}{dz}$ a été fixé à -0.0065 C/m sur recommandation de MétéoSuisse.

- Si $H_{N,i} > H_{N,\max}$: la couverture neigeuse au point i est supérieure à la hauteur seuil. Une extrapolation avec un gradient constant est effectu e par régression linéaire des températures fournies aux altitudes supérieures, pour le point de grille donné.

$$T_{s,i} = A_i \cdot z_s + B_i \quad (6.4)$$

avec A_i : paramètre d'interpolation pour le point i COSMO-CH7 [ C/m]; B_i : paramètre d'interpolation pour le point i COSMO-CH7 [ C].

Finalement l'interpolation spatiale peut être r alis e selon (6.5) :

$$T_s = \frac{\sum_{i=1}^n T_{s,i} \cdot \frac{1}{d_{i,s}^2 \cdot dz_{i,s}^2}}{\sum \frac{1}{d_{i,s}^2 \cdot dz_{i,s}^2}} \quad (6.5)$$

Mise à jour du modèle hydrologique

La simulation continue permet la modélisation de processus différents sur de longues périodes sans nécessité de modifier les paramètres du modèle. Bien que gourmande en données, cette méthode fournit des résultats nombreux et compréhensibles, puisque les différents processus ou cycles hydrologiques peuvent être repérés aisément de manière visuelle. La simulation continue présente toutefois quelques risques qu'il convient de minimiser.

Le premier risque est la dérive du modèle hydrologique par rapport à la réalité. Il s'agit alors d'une tendance du modèle à s'éloigner en moyenne de plus en plus de l'observation. Ce problème peut survenir si le calage n'a pas été effectué sur une période couvrant tous les cycles hydrologiques connus. Le modèle peut ainsi stocker continuellement de l'eau ou au contraire vider lentement tous ses stocks, ce qui a pour effet de compenser les éventuelles erreurs de bilan hydrique annuel. Une procédure de calage et validation appropri e et un contrôle du comportement multi-annuel des stocks des réservoirs-sol permet cependant de supprimer ce risque.

Le deuxième risque apparaît lors de l'utilisation d'un modèle de simulation continue pour l'évaluation d'une courte période. Il s'agit pourtant de l'utilisation typique des modèles de prévision de débit, où les stocks des réservoirs-sol sont estimés par la simulation continue et servent de conditions initiales pour une simulation en prévision ou  v nementielle. Il est alors pratiquement impossible de détecter ou de prévoir l'incertitude de la prévision hydrologique. Une solution consiste alors à comparer la simulation et l'observation sur une période

précédant la période de prévision ou d'analyse afin de déterminer la provenance de l'erreur. Une correction appropriée des données d'entrée, du paramétrage ou des variables d'état permet alors au modèle de se rapprocher de l'observé sur la période de contrôle (procédure de filtrage). Il suffit d'espérer ensuite que cette correction soit également appropriée pour la période de prévision puisque qu'elle y sera extrapolée.

Provenance des incertitudes et stratégies de correction

Dans un modèle hydrologique conceptuel tel que celui décrit ici, les incertitudes sont propagées et accentuées à de multiples niveaux de la chaîne d'information. Leurs principales sources sont listées ci-dessous selon le groupe auquel elles appartiennent. Il est supposé ici que le modèle est construit correctement et qu'aucune erreur de construction du modèle n'est à déplorer.

Erreurs liées à la donnée d'entrée

- erreur de mesure d'une variable de commande
- erreur de spatialisation d'une variable de commande
- non-mesure ou mauvaise estimation d'une variable de commande

Erreurs liées à la modélisation

- concept de modélisation inadapté
- processus hydrologique manquant, non modélisé, négligé ou non repéré
- degré de simplification trop important (sous-détermination)
- degré de complexité trop important (sur-détermination)
- incertitude liée au paramétrage du modèle

Erreurs liées à la simulation continue

- erreur dans les conditions initiales (impact temporaire)
- mauvaise estimation de l'état du modèle (variables d'état)

Erreur liée à la variable de contrôle

- erreur de mesure d'une variable de contrôle

- mauvaise estimation de la part de débit due à l'intervention humaine (turbinage, vidange, purge) ou à un événement exceptionnel (rupture de digue, embâcle, débâcle)

La multiplicité des sources d'incertitude rend l'estimation et la réduction de ces erreurs délicate. Il conviendrait en effet de limiter l'ampleur de chaque source d'incertitude, mais cela demanderait une quantité énorme d'informations, non disponibles ou non gérables. Différents remèdes existent pour réduire l'incertitude, qui ont un coût, une performance ou des contingences fort différentes. Voici quelques exemples d'améliorations toujours souhaitables avec leurs particularités, par ordre décroissant d'efficacité supposée:

- augmentation de la densité du réseau de mesure des variables de commande (diminue les erreurs de spatialisations et d'estimation de ces variables)
- augmentation de la densité du réseau de mesure des variables de contrôle (diminue les erreurs de modélisation, permet le développement de concepts de modélisation plus performants)
- filtrage du modèle hydrologique (ajustement temporaire du modèle sur l'observation, diminue l'erreur d'estimation de l'état du modèle ou des conditions initiales)
- amélioration du calage du modèle (amélioration du paramétrage)
- amélioration de la précision des mesures des variables de commande et de contrôle (réduction de l'erreur liée aux mesures)

Les stratégies les plus efficaces pour réduire l'incertitude sont bien entendu les plus difficiles à réaliser en raison des coûts et des délais d'installation. Si l'amélioration du calage ne va pas beaucoup modifier la situation (le calage initial pouvant être supposé satisfaisant si le développeur a correctement effectué son travail), le filtrage du modèle est par contre une stratégie intéressante et souvent mise en oeuvre pour compenser temporairement les incertitudes du modèle hydrologique. Trois niveaux peuvent être filtrés, mais pas simultanément pour éviter des problèmes de compensation des corrections:

- filtrage des variables de commande
- filtrage des variables d'état
- adaptation du paramétrage

Dans le cadre de ce travail, le filtrage des variables d'état du modèle hydrologique a été implémenté pour différentes raisons. Tout d'abord, la modification des variables de commande (champs de précipitation,

température et ETP) est extrêmement compliquée et difficilement contrôlable. Les valeurs des variables de commandes ne pouvant être vérifiées, il est dangereux de les modifier subjectivement. De plus, l'impact d'une modification de ces champs (dans le temps et/ou dans l'espace) est fortement non-linéaire et difficilement prévisible. Ensuite, la modification du paramétrage pourrait fonctionner pour un modèle plutôt sous-déterminé, c'est-à-dire où des processus ne seraient clairement pas modélisés et où le calage ne serait pas adapté à certaines périodes de l'année. Ce n'est pas le cas du modèle semi-distribué présenté ici, puisque les principaux processus sont considérés. Il serait même possible que la modification du paramétrage n'ait que très peu d'influence sur les résultats à court terme (quelques heures) et une forte influence à long terme (plusieurs jours). Le filtrage des variables d'état du modèle permet quant à lui d'agir sur le front des variables de commande et sur celui des conditions initiales, puisque qu'une augmentation du niveau d'un réservoir aura presque le même effet que l'augmentation de la précipitation supposée et permettra au modèle de produire plus de volume à court terme, sans péjorer la situation à long terme en raison du temps de réponse du modèle.

Algorithme de filtrage des variables d'état du modèle hydrologique

L'application de la procédure de mise à jour du modèle hydrologique est relativement similaire à celle de calage. En effet, il s'agit d'abord d'éviter que les incertitudes puissent se compenser aléatoirement. Il faut donc réaliser le filtrage de l'amont vers l'aval. Le calcul de l'ajustement à un point de contrôle doit se faire sans influence de l'ajustement effectué en amont si celui-ci est imparfait, en y injectant des mesures là où cela est possible. Les données de contrôle sont presque les mêmes que pour le calage, avec une restriction toutefois: seules les mesures de débit disponibles en temps réel doivent être exploitées en mode opérationnel. Le bassin versant est donc à nouveau décomposé en différentes zones sur lesquelles le modèle hydrologique est mis à jour séparément.

Pour chaque zone considérée à l'amont d'un point de contrôle (mesure de débit en temps réel), l'algorithme de filtrage des variables d'état est lancé. Ce dernier suit un principe d'ajustement du volume produit par le modèle sur une période donnée. Il ne cherche donc pas à obtenir le meilleur débit à une heure donnée mais plutôt à simuler un volume correspondant au volume mesuré sur une période de plusieurs heures. Cette méthode évite ainsi une importante erreur sur l'estimation de l'état du modèle malgré une production de débit conforme à l'observation. En particulier, la tendance de l'hydrogramme est ainsi correctement modélisée.

L'algorithme est itératif car l'influence d'une modification des niveaux dans les réservoirs-sol est non-linéaire. Les principales hypothèses sur lesquelles est bas e la méthode de filtrage sont les suivantes :

- le modèle est "bon" : le rapport entre les différentes composantes de débit à l'amont d'un point de contrôle peut être conservé. En pratique, cela signifie que tous les niveaux des réservoirs des différents sous-bassins versants sont modifiés dans la même proportion
- il n'y a pas de préférence dans le choix du processus hydrologique à corriger : les niveaux des réservoirs linéaires de glace et de neige ainsi que des réservoirs GR3 et SWMM sont ajustés
- une période d'analyse des volumes minimale de 12 heures doit permettre de négliger l'effet du temps de transfert de l'onde de crue de l'amont vers l'aval de la zone consid r e. Cette durée permet également de réduire les incertitudes dues au turbinage
- le temps de transfert d'une zone à l'autre peut être négligé : si l'ajustement du volume d'une zone situ e à l'amont est bon, le débit simulé peut être directement introduit dans le modèle et non la mesure

Le déroulement de l'algorithme de filtrage passe par plusieurs étapes. De multiples calculs peuvent être effectués en parallèle pour autant qu'ils n'aient pas d'influence les uns sur les autres. Ainsi, les sous-bassins versants de tête peuvent être filtrés simultanément (zones de niveau 1), puis les sous-bassins intermédiaires (zones de niveau 2), et ainsi de suite jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

1. définition des conditions initiales (h_{ini}) du modèle hydrologique au début de la période de filtrage
2. $i=1$
3. pour chaque zone de niveau i :
 - a. extraction des mesures de débit des sous-bassins versants de zone i sur la période de filtrage
 - b. $n=1$
 - c. simulation sur la période de filtrage
 - d. comparaison entre volumes mesurés et observés et calcul des coefficients de correction de niveau i
 - e. si tous les coefficients de correction de niveau i sont égaux à $1+\epsilon$, ou si $n > n_{max}$, aller à 4)

- f. multiplication du niveau initial des réservoirs (R_N , R_{GL} , GR3, SWMM) de zone i par leur coefficient de correction de zone i correspondant
 - g. $n=n+1$
 - h. retour à c)
4. $i=i+1$
5. si $i>i_{max}$, fin de l'algorithme et sauvegarde des nouvelles conditions initiales des réservoirs

Il s'agit donc d'un algorithme à double boucle. La première boucle concerne les niveaux de zone et ne fait pas l'objet d'itération. La deuxième boucle est une itération sur le calcul du coefficient de correction avec pour critère de sortie la convergence de la solution ou le nombre d'itérations. Ce coefficient de correction C_{MAJ} peut se calculer selon (6.6) :

$$C_{MAJ} = 1 + \eta \cdot \frac{V_{obs} - V_{sim}}{V_{sim}} \quad (6.6)$$

η est un coefficient d'amortissement qui évite à l'algorithme de filtrage de diverger, V_{sim} et V_{obs} sont les volumes simulés sur la période de filtrage. Une fois le coefficient de correction calculé à l'itération n , la nouvelle condition initiale d'un réservoir pour l'itération $n+1$ s'obtient facilement (6.7) :

$$h_{ini,n+1} = C_{MAJ} \cdot h_{ini,n} \quad (6.7)$$

Les 4 réservoirs sont corrigés simultanément afin de ne pas discriminer un processus hydrologique au détriment d'un autre. La correction d'une partie seulement des réservoirs résulterait d'une hypothèse sur la source de l'erreur, qui n'est pourtant pas vérifiable. En effet, le débit observé servant de mesure de contrôle ne permet pas de séparer les différents processus de formation de l'écoulement. Il serait ainsi dangereux de prétendre qu'un déficit en eau du modèle lors d'une crue proviendrait plus de la fonte que du ruissellement de surface (donc de la précipitation).

Illustration du fonctionnement de l'algorithme de filtrage

Un exemple d'application de l'algorithme de filtrage des variables d'état du modèle hydrologique est présenté afin de permettre au lecteur de visualiser son fonctionnement. Il s'agit de la Lonza   Blatten, dont le bassin versant est en tête, non perturbé, à forte proportion glaciaire et situé au Nord du bassin versant du Rhône. Il a une surface totale de

77.6 km² dont 33.6% de glaciers, son altitude varie entre 1519 m s.m.   Blatten et 3889 m s.m. au sommet du Bietschhorn avec une moyenne   2613 m s.m. Le modèle hydrologique de ce bassin versant se compose de 18 bandes d'altitude dont 6 sont des bandes glaciaires, ce qui représente 36 niveaux de réservoirs à corriger simultanément. Les données météorologiques utilis es sont les observations (prévisions parfaites).

La figure 5.2 présente le comportement du modèle hydrologique avec mise à jour des niveaux des réservoirs en comparaison de la simulation continue sans filtrage et de l'observation. L'exemple présenté montre les étapes durant lesquelles le filtrage est effectué. Tout d'abord, une première correction est effectu e le 14.10.2000   00h en comparant les volumes des 24 heures précédentes (a). L'hydrogramme obtenu par simulation continue qui sous-estime le débit observé est modifié grâce à l'augmentation appropri e du niveau des réservoirs. Le dernier débit simulé correspond même au dernier débit mesuré, mais cela n'est qu'un hasard. Une nouvelle correction est effectu e 12 heures plus tard (b) et améliore aussi significativement le comportement du modèle hydrologique. Le dernier filtrage est opéré le 15.10   00h, toujours sur une période de 24 heures. La comparaison entre les différentes simulations est pr sent e en (d) jusqu'au 16.10   00h   la fin de la crue. Le débit maximum observé est de 50 m³/s, tandis que le débit de pointe obtenu par simulation continue non filtr e est seulement de 23 m³/s. Le premier filtrage du 14.10   00h permet au modèle d'atteindre 38 m³/s, tandis que les deux filtrages suivants donnent des résultats similaires et des débits de pointe de 51 et 53 m³/s. Le cas de la Lonza est un exemple où le filtrage permet bien de corriger une mauvaise estimation des niveaux dans les réservoirs au début de la crue malgré un débit de base simulé similaire au débit observé avant la crue.

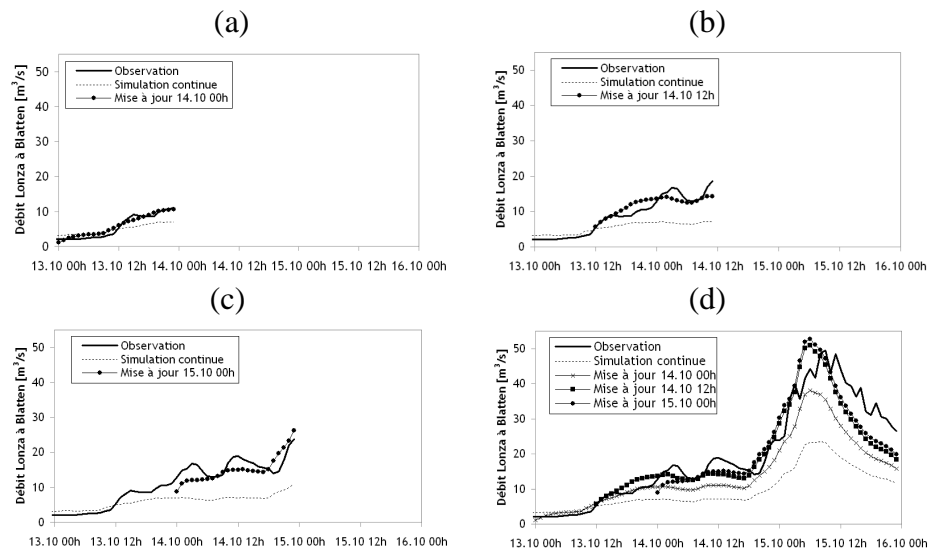


Figure 5.2 : Comparaison entre observations et simulations avec et sans mise à jour du modèle hydrologique lors de la crue du 13 au 16.10.2000 de la Lonza à Blatten. (a) état le 14.10 00h, mise à jour sur 24h du 13.10 00h au 14.10 00h ; (b) état le 14.10 12h, mise à jour sur 24h du 13.10 12h au 14.10 12h ; (c) état le 15.10 00h, mise à jour sur 24h du 14.10 00h au 15.10 00h ; (d) état le 16.10 00h et comparaison entre les simulations avec différentes mises à jour.

Dans le cas où ce ne sont pas les niveaux dans les 4 réservoirs qui sont la cause de l'imprécision mais l'estimation de la quantité de précipitation, l'algorithme de filtrage fonctionnera également. Cependant, si une erreur dans l'estimation des températures est à déplorer, il faut s'attendre à un comportement décevant de l'algorithme. L'exemple du Triftbach présenté à la figure 5.3 illustre ce fait lors de la même période de crue en octobre 2000. Dans ce cas, son bassin versant est situé dans la vallée de la Viège en rive gauche, juste à l'amont de Zermatt. C'est également un bassin versant de tête, non perturbé, et à forte proportion glaciaire. Il a une surface totale de 10.6 km^2 dont 51% de glaciers, son altitude varie entre 2449 m s.m. à la prise d'eau de Grande Dixence et 4221 m s.m. au sommet du Zinalrothorn avec une moyenne à 2613 m s.m. Le modèle hydrologique de ce bassin versant se compose de 6 bandes d'altitude dont 3 sont des bandes glaciaires. Au début de la période étudiée, la simulation continue sous-estime de débit observé en régime de base et de fonte glaciaire.

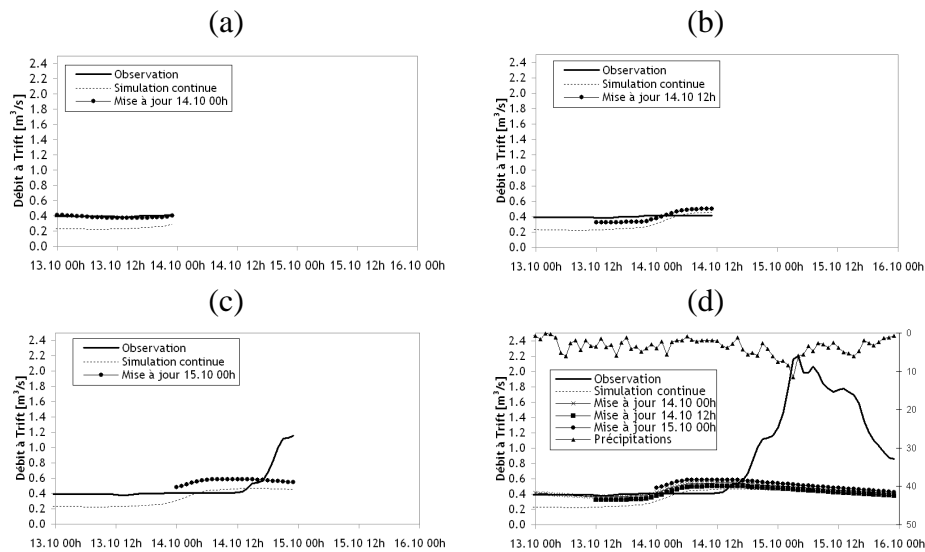


Figure 5.3 : Comparaison entre observations et simulations avec et sans mise à jour du modèle hydrologique lors de la crue du 13 au 16.10.2000 à Trift. (a) état le 14.10 00h, mise à jour sur 24h du 13.10 00h au 14.10 00h ; (b) état le 14.10 12h, mise à jour sur 24h du 13.10 12h au 14.10 12h ; (c) état le 15.10 00h, mise à jour sur 24h du 14.10 00h au 15.10 00h ; (d) état le 16.10 00h et comparaison entre les simulations avec différentes mises à jour.

Le premier filtrage du 14.10.2000 à 00h rétablit parfaitement le débit (a), tout comme le deuxième filtrage 12 heures plus tard (b). Les premières difficultés apparaissent le 15.10 à 00h (c), lorsque le modèle ne parvient pas à simuler une montée en crue. La synthèse de l'événement (d) montre que malgré les précipitations considérées par le modèle hydrologique, aucune réaction du bassin versant n'a pu être simulée. L'augmentation artificielle des niveaux des réservoirs n'a pas non plus eu l'effet escompté. La raison est la vraisemblable sous-estimation des températures empêchant toute formation d'hydrogramme de crue par le modèle. En effet, la température moyenne journalière estimée à l'altitude du centre de gravité du bassin versant est passée de 0.38°C le 13.10 à 0.85°C le 14.10 pour chuter à -2.32°C le 15.10 lors de la crue. C'est la station de Zermatt qui dans ce cas avait la plus forte pondération, mais elle est située 1600 mètres plus bas, et le gradient employé de -0.0054°C/m est certainement la cause de cette sous-estimation des températures dans la région. Il y a en effet parfois, lors des fortes précipitations, une réduction du gradient altimétrique qui provoque une uniformisation des températures. Ce phénomène n'a pas été modélisé et empêche ainsi le modèle hydrologique de réagir dans de telles situations.

La procédure de mise à jour du modèle hydrologique présentée dans ce chapitre offre donc une possibilité d'adapter le modèle pour lui permettre de mieux simuler l'observé. Dans les situations de mauvaise estimation des niveaux des réservoirs par la simulation continue ou

des précipitations, l'algorithme de filtrage fournit des résultats satisfaisants. L'interaction de la température provoque toutefois des situations où le filtrage devient inefficace.

Simulations avec mise à jour du modèle hydrologique

La procédure de mise à jour des variables d'état du modèle hydrologique telle que décrite au paragraphe précédent a été implémentée dans le modèle hydrologique du Rhône. 23 stations de mesure ont été utilisées comme données de contrôle, et ainsi 23 zones ont été mises à jour séparément. Ces zones sont réparties en 6 niveaux, ce qui permet de limiter les temps de calcul (figure 5.4).

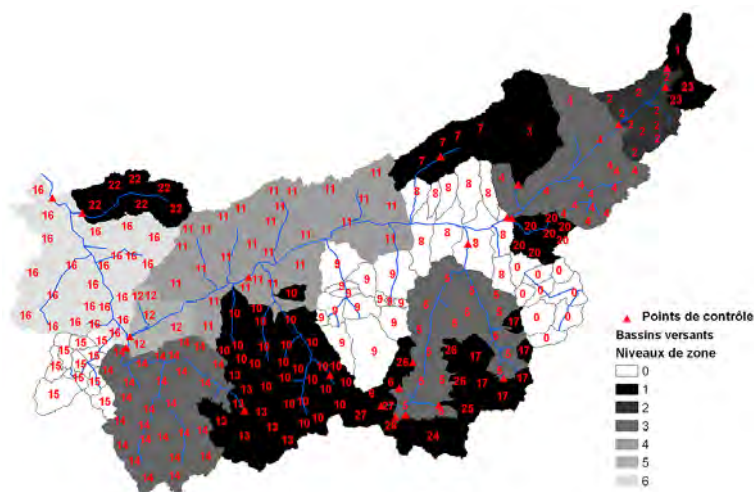


Figure 5.4 : Carte des niveaux de zones avec leurs points de contrôle. Les niveaux de zone 0 ne sont pas mis à jour.

Le tableau 6.1 présente les zones ainsi que leurs principales caractéristiques. 4 zones ne sont pas filtrées mais sont tout de même considérées dans le calcul en simulation continue, car elles ne disposent d'aucun point de contrôle fiable et présentent des caractéristiques trop différentes des zones voisines. La zone 0 (Dovéria) est située hors du bassin versant du Rhône et n'est pas contrôlée, la zone 8 (Steg) se trouve le long du Rhône entre Viège et Sierre mais il est en l'état impossible d'isoler sa production propre de débit. Les zones 9 (Anniviers) et 15 (Trient) ne disposent d'aucune mesure de débit en temps réel, ce qui rend également impossible la vérification de la production de débit par le modèle. Ces zones ne peuvent en outre pas vraiment être traitées comme leurs voisines car les phénomènes météorologiques qui s'y produisent peuvent être très différents.

Chapitre 5 – Prévision hydrologique

Tableau 6.1 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des zones de filtrage. La surface est en km² et l'altitude moyenne de la zone en m s.m.

<i>Niv. Zone</i>	<i>No Zone</i>	<i>Perturbé</i>	<i>Surf.</i>	<i>% glacier</i>	<i>Alt. moy</i>
1	1		39.4	42.8	2'718
1	3		198.5	54.0	2'946
1	6		13.7	39.5	3'215
1	7		136.9	29.6	2'491
1	10		414.7	16.7	2'462
1	13		168.8	42.7	2'943
1	17		123.1	31.7	3'001
1	20		77.1	3.7	2'018
1	22		159.9	4.1	1'540
1	23		39.6	2.1	2'387
1	24		79.9	73.8	3'248
1	25		21.0	80.7	3'311
1	26		59.4	48.6	3'326
1	27		50.9	44.5	2'944
1	28		13.5	55.9	3'030
2	2		152.1	6.6	2'204
3	4	perturbé	399.8	11.4	2'138
3	5	perturbé	385.1	6.0	2'352
3	14	perturbé	508.8	5.4	2'029
4	11	perturbé	812.7	0.5	1'579
5	12	perturbé	110.0	0.0	1'146
6	16	perturbé	549.7	0.5	1'324
pas de filtrage	0	perturbé	172.0	10.1	2'254
pas de filtrage	8	perturbé	335.0	4.5	1'853
pas de filtrage	9	perturbé	349.8	13.6	2'467
pas de filtrage	15	perturbé	160.6	10.2	2'075

Les 4 principales crues disponibles ont été simul es intégralement avec la procédure de mise à jour. Les calculs ont été réalisés de la manière suivante : une simulation d'initialisation a été effectu e 5 jours avant la pointe de la crue, la première mise à jour a été r alis e 3 jours avant la pointe à 00h, puis r p t e toutes les 12 heures jusqu'au moment de la pointe de crue observ e. La mise à jour et l'évaluation de sa performance pour les différentes simulations ont été établies comme suit :

- période de mise à jour de 24 heures
- facteur d'amortissement : 0.95
- nombre maximum d'itérations : 5
- période d'évaluation : 48 heures de 00h   00h autour de la pointe de crue
- calcul du critère de Nash sur la période d'évaluation
- calcul du biais volumétrique sur la période d'évaluation
- calcul du rapport entre débit maximum observé et débit maximum simulé

Différents paramétrages de l'algorithme de filtrage ont été testés. En particulier, la durée de la période de filtrage a été  tudi e et les performances les plus satisfaisantes ont été obtenues pour des durées de 24 heures. En effet, un filtrage sur une durée de 12 heures par exemple ne permet pas de discriminer avec certitude les ondes dues au turbinage ou les cycles journaliers de fonte de neige et de glace. L'algorithme risque ainsi de corriger des différences dues non pas aux niveaux dans les réservoirs mais à d'autres phénomènes de plus grande fréquence. Le filtrage sur une période de 36 ou 48 heures n'est pas non plus souhaitable car il retarde trop fortement la correction. En effet, il faudrait attendre la pointe de la crue pour bénéficier de la première mise à jour efficace du modèle. Le facteur d'amortissement η n'est pas très sensible mais permet d'éviter que l'algorithme ne tourne indéfiniment autour de la valeur $C_{MAJ}=1$. Il a enfin été observé que 5 itérations suffisent pour obtenir une bonne adéquation entre volume simulé et volume observé sur la période de filtrage (imprécision moyenne de 1-3% lorsque la mise à jour est possible).

La figure 5.5 présente les résultats des simulations de la crue d'octobre 2000 à la Porte du Scex avec mise à jour du modèle hydrologique. Les différents hydrogrammes présentés permettent d'analyser le comportement de l'algorithme de filtrage au cours du temps. Les premières mises à jour des 13.10 et 14.10 entraînent une dégradation de la performance du modèle par rapport à la simulation continue sans filtrage. En effet, le débit simulé entre le 12.10 et le 14.10 étant légèrement supérieur au débit observé, l'algorithme à tendance à réduire les niveaux des réservoirs-sol. Cela se traduit par une sous-estimation des débits lors de la pointe de la crue car les précipitations n'ont vraisemblablement pas été surestim es. Une nette amélioration de la performance de la mise à jour est visible dès le 14.10   12h lorsque la mont e en crue débute, et l'hydrogramme avec mise à jour du 15.10   00h offre le meilleur résultat. Dans la plupart des situations mod lis es et pour de nombreux points de contrôle, de telles observations ont pu être faites. La mise à jour du modèle hydrologique semble dégrader la performance par rapport à la simulation continue en période d'étiage, mais elle l'améliore dès qu'une tendance d'augmentation du débit observé se dessine. Il semble donc que les stocks des réservoirs du modèle hydrologique soient relativement bien estimés par la simulation continue et que le filtrage corrige surtout une mauvaise estimation des précipitations.

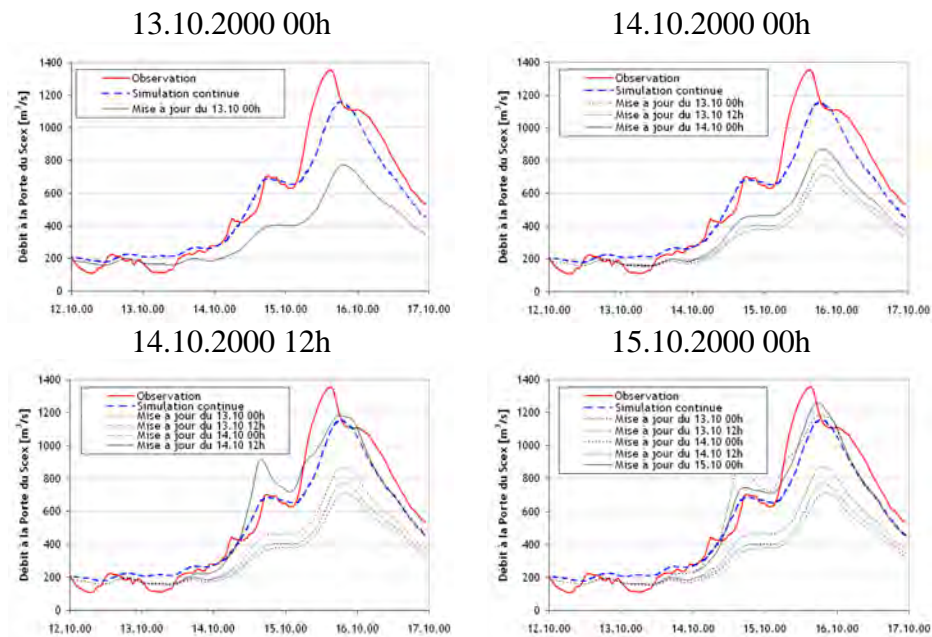


Figure 5.5 : Hydrogrammes de crue à la Porte du Scex, comparaison entre valeurs observées et simulées avec mise à jour du modèle hydrologique.

Les résultats des quatre événements de crue analysés sont présentés à la figure 5.6, où la situation de référence est la simulation continue sans filtrage. Les indicateurs présentés sont la moyenne arithmétique des indicateurs des 23 points de contrôles. Il n'y a donc pas de pondération particulière en fonction de la contribution de chaque zone au débit total par exemple. Pour chacun des indicateurs considérés, la meilleure valeur est 1, raison pour laquelle elle est mise en évidence dans les graphes présentés. Il est à nouveau remarquable que les deux premières mises à jour du modèle n'améliorent en moyenne pas la performance de la simulation, mais que les suivantes y parviennent. Les résultats indiquent une sous-estimation systématique de 20% à 40% du volume des crues et des débits de pointe. Les valeurs des coefficients de Nash sont particulièrement mauvaises car cet indicateur est extrêmement sensible lorsque la période d'évaluation est très courte. Il augmente tout de même significativement avec les mises à jour au début de la crue.

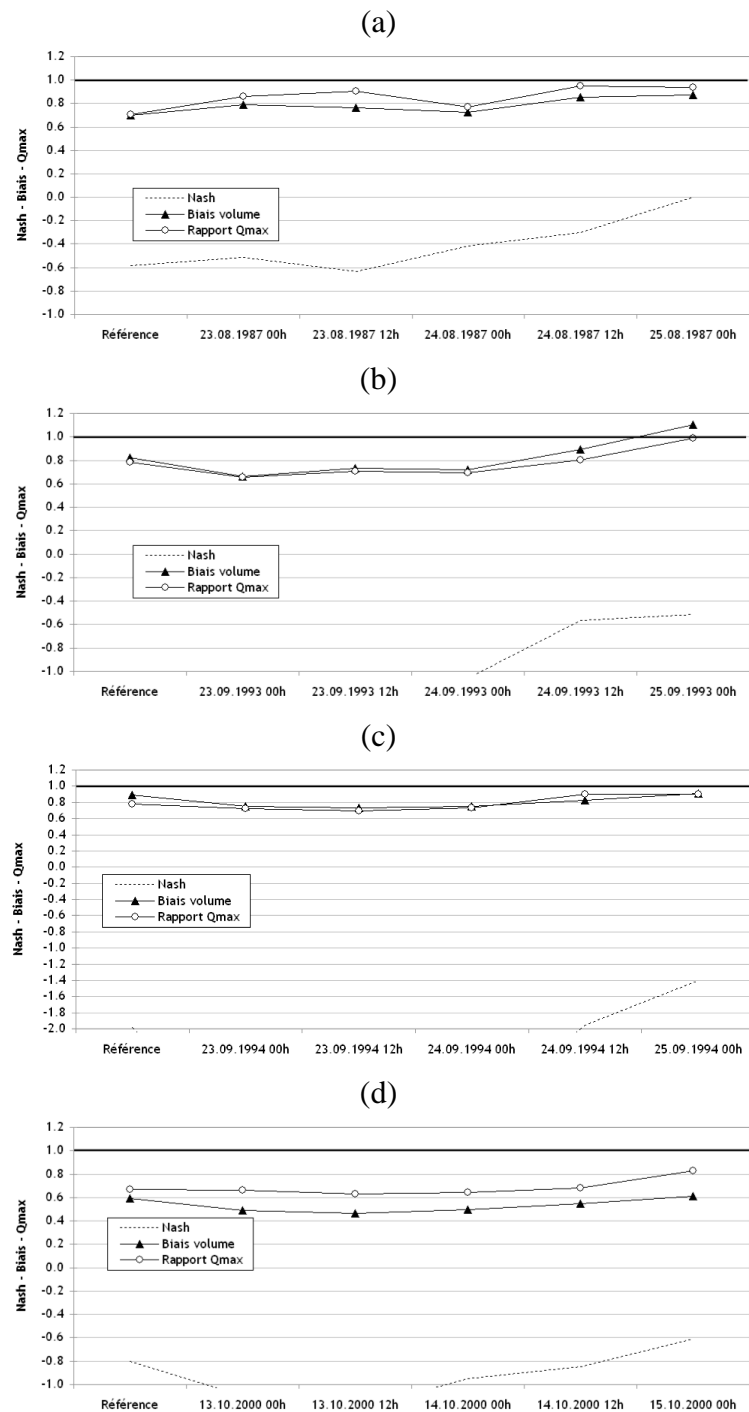


Figure 5.6 : Synthèse des résultats des simulations lors des crues de 1987, 1993, 1994 et 2000 avec mise à jour du modèle hydrologique. La référence est la simulation continue sans filtrage.

Suite à l'analyse de ces résultats, quelques recommandations peuvent être faites :

- la mise à jour du modèle hydrologique n'est pas souhaitable lors des périodes d'étiage
- elle peut en revanche apporter une amélioration significative des résultats dès qu'une tendance de montée en crue apparaît (24-36 heures avant la pointe de la crue).

Prévision hydrologique en période de crue

La prévision hydrologique en période de crue est un processus cyclique comprenant plusieurs étapes : la collecte des dernières informations disponibles, l'établissement des conditions initiales du modèle hydrologique, le calcul de la prévision, l'attente de nouvelles informations et le début d'un nouveau cycle.

Simulation continue avec *Routing System II*

L'objectif de la simulation continue est de déterminer les conditions initiales typiques avant de lancer une prévision hydrologique. Cette opération est réalisée comme suit.

Après récupération des dernières mesures météorologiques sur le réseau connecté en temps réel, il s'agit de réaliser une simulation *Routing System II* avec les données mesurées, sur une longue période avant la prévision. La simulation sera effectuée sur une période débutant en automne, plusieurs mois avant la date de la prévision (en général la date actuelle), jusqu'à l'heure de début de la prévision. Cette technique permet ainsi au modèle de constituer correctement les stocks de neige durant l'hiver et garantit des conditions antécédentes d'humidité réalistes au printemps.

Une fois cette initialisation effectuée (fournissant de bonnes valeurs des conditions initiales, c'est-à-dire de H_N , θ , h , h_r , H_{NGL} et H_{GL}), la tâche consiste à réaliser une prévision hydrologique avec le modèle ainsi initialisé (« *HotStart* ») et les prévisions météorologiques (« *Prediction Mode* ») en exploitant cette fois-ci non pas les mesures météorologiques, mais les prévisions météorologiques disponibles. Ce processus est répété à chaque nouvelle prévision.

Simulation *Routing System II* avec mise à jour automatique du modèle

Une autre technique d'initialisation du modèle hydrologique est d'effectuer une mise à jour des variables d'état du modèle de simulation sur une courte période (en général 24 heures) précédant le début de la prévision COSMO-CH7, en employant le « *Solve Update* ». Cette mise à jour consiste à comparer les hydrogrammes

réels avec les hydrogrammes simulés et à corriger le modèle en conséquence (Data assimilation). Cette procédure est itérative.

Après avoir démarré une première simulation comme mentionné au paragraphe précédant (plusieurs mois avant la prévision), une deuxième simulation est réalisée à partir des mesures météorologiques avec le « *HotStart* » sur les 24 heures avant le début de la prévision COSMO-CH7. Le logiciel fait varier les valeurs initiales des variables d'état avant de démarrer une nouvelle simulation, et évalue si l'hydrogramme simulé avec les nouvelles valeurs initiales est plus proche de la réalité. Dans le cas contraire, les variables sont ajustées dans l'autre direction. Le processus itératif continue jusqu'à obtenir un volume sur la période de 24 heures plus ou moins égal à celui observé. Finalement, suite à la mise à jour des variables d'état, une dernière simulation est effectuée avec les prévisions MétéoSuisse (avec le « *HotStart* » et le « *Prediction Mode* », en remplaçant la base de données des mesures par celle des prévisions).

Choix de la prévision hydrologique

Des études ont été effectuées (García, 2006) afin d'analyser les différences entre les prévisions météorologiques successives lors d'événements de crue. Pour ce faire, les crues de 1987, 1993, 1994 et 2000 ont été re-simulées par MétéoSuisse (modèle COSMO-CH7, version novembre 2006) et les simulations hydrologiques correspondantes ont été réalisées.

Les résultats des analyses ont montré que les différences de volume des précipitations variaient fortement d'une prévision à l'autre, sans structure systématique de l'erreur. De plus, l'incertitude augmentait systématiquement avec l'horizon de prévision, les 12 premières heures de la prévision étant les plus fiables. Ce dernier résultat est tout à fait conforme à ce qui est observé sur d'autres modèles et dans d'autres régions.

En pratique, ces résultats indiquent qu'il convient d'exploiter la prévision météorologique la plus récente pour prévoir les débits dans les prochaines heures. Cette dernière prévision est d'autant plus réaliste à un horizon de 12-24 heures qu'elle est ajustée sur les mesures en temps réel à tous les niveaux : le modèle COSMO-CH7 est ajusté par MétéoSuisse sur la base des observations sur le terrain, tandis que le modèle hydrologique est ajusté sur la base des dernières mesures de débit. Ainsi, l'heure d'arrivée du débit de pointe ainsi que son amplitude sont mieux estimées avec les derniers résultats disponibles.

Pour une estimation de la situation hydrologique du bassin versant à plus long terme (72 heures), les résultats des simulations indiquent que l'aspect général de la crue ainsi que les régions les plus arrosées peuvent être déterminés, mais l'information quantitative reste sujette à

une très forte incertitude. Enfin, il convient de rappeler que l'incertitude des prévisions météorologiques peut être très importante et s'exprimer sous forme de décalage temporel, d'amplitude ou de localisation.

Chapitre 6

Le modèle d'aide à la décision

Le modèle d'aide à la décision doit permettre aux responsables de la cellule scientifique de crise de proposer des opérations de vidange préventive des retenues alpines lors des crues. Ces opérations peuvent en effet se révéler d'une grande utilité pour la protection de la vallée du Rhône contre les inondations.

Le modèle d'aide à la décision se base sur les prévisions hydrologiques et l'état de remplissage des retenues des grands aménagements hydroélectriques pour déterminer si des opérations de turbinage, de pompage ou de vidange particulières doivent être entreprises. Ce modèle est constitué d'un outil d'évaluation de la situation hydrologique en fonction des manœuvres effectuées par les aménagements, ainsi que d'un outil d'optimisation de ces manœuvres afin de réduire les coûts liés à la crue.

Ce chapitre présente les éléments du modèle d'aide à la décision ainsi que ses performances en comparaison avec des prévisions parfaites et une évaluation exacte des effets des aménagements hydroélectriques. Les sujets présentés sont:

- Concept du modèle d'aide à la décision
- Outil d'estimation des hydrogrammes à l'aval des aménagements hydroélectriques
- Fonctions principales de la version opérationnelle de l'outil d'optimisation
- Validation théorique du modèle d'aide à la décision

Concept du modèle d'aide à la décision

L'optimisation des opérations préventives sur les aménagements hydroélectriques se base sur les règles suivantes :

- Maximiser l'adduction lors de la pointe de la crue
- Minimiser les rejets lors de la pointe de la crue.

L'adduction maximale possible est estimée à partir des volumes ruisselés aux exutoires des sous-bassins versants concernés. Ces volumes ruisselés sont intégrés à partir des hydrogrammes de prévision calculés avec le modèle hydrologique. Selon le volume libre dans la retenue, une consigne de turbinage ou de vidange est proposée.

Les effets de l'adduction et du turbinage ou de la vidange doivent ensuite être évalués aux points de contrôle aval pour chaque solution proposée. Cependant, l'emploi du modèle RSII n'est pas approprié pour cette opération car les temps de calcul sont trop importants.

Une méthode d'évaluation de l'effet des aménagements sur les hydrogrammes aval a été développée et implémentée dans le programme d'optimisation.

Estimation des hydrogrammes à l'aval des aménagements hydroélectriques

Données nécessaires

Les données nécessaires à l'évaluation de l'hydrogramme aval sont décrites ci-dessous, pour 1 aménagement :

- Hydrogramme entrant dans la retenue avec maximisation de l'adduction (captages fonctionnels, pompage maximum)
- Hydrogramme aval sans aménagements
- Niveau initial de la retenue
- Temps de transit de l'onde entre le lieu d'adduction principal et le point de contrôle aval
- Temps de transit de l'onde entre le rejet de la centrale et le point de contrôle aval
- Temps de transit de l'onde entre le rejet de la vanne intermédiaire ou de fond et le point de contrôle aval.

Méthode de calcul

La méthode de calcul proposée suit de près le trajet de l'écoulement capté. L'eau qui a été captée ne va pas vers le point de contrôle, mais vers la retenue. Elle doit donc être soustraite à l'hydrogramme sans aménagement en tenant compte du temps de transit entre captage et point de contrôle. Le niveau de la retenue augmente à cause de cet apport et diminue à cause des rejets qui sont ajoutés à l'hydrogramme

aval en tenant compte du temps de transit entre point de rejet et point de contrôle. Le cas échéant, la retenue déborde et déverse (calcul de laminage), produisant un débit supplémentaire à l'aval après transit entre évacuateur et point de contrôle (figure 6.1).

L'équation de bilan d'une retenue j peut être évaluée par (7.1):

$$\frac{\partial V_j}{\partial t} = Q_{in,j}(t) - Q_{out,j}(t) - Q_{PO,j}(t) \quad (7.1)$$

V_j est le volume stocké dans la retenue j , $Q_{in,j}(t)$ l'hydrogramme (maximum) entrant dans la retenue j , $Q_{out,j}(t)$ l'hydrogramme déversé par l'évacuateur de la retenue j , $Q_{PO,j}(t)$ le débit turbiné et évacué par la vidange intermédiaire ou de fond.

Le débit $Q_k(t)$ au point de contrôle k dépend du débit prévu sans aménagements hydroélectriques $Q_{nat,k}(t)$, du débit entrant $Q_{in,j}(t)$ dans la retenue j , située à l'amont de k , du débit turbiné $Q_{PO,j}(t)$ à la centrale de l'aménagement j (rejet situé à l'amont de k), du temps de transit centrale – point de contrôle $t_{t,PO,jk}$. Il dépend également du débit déversé $Q_{out,j}(t)$ et du temps de transit évacuateur – point de contrôle $t_{t,out,jk}$:

$$Q_k(t) = Q_{nat,k}(t) - Q_{in,j}(t - t_{t,in,jk}) + Q_{PO,j}(t - t_{t,PO,jk}) + Q_{out,j}(t - t_{t,out,jk}) \quad (7.2)$$

Ce calcul est effectué pour tout aménagement situé à l'amont du point de contrôle k .

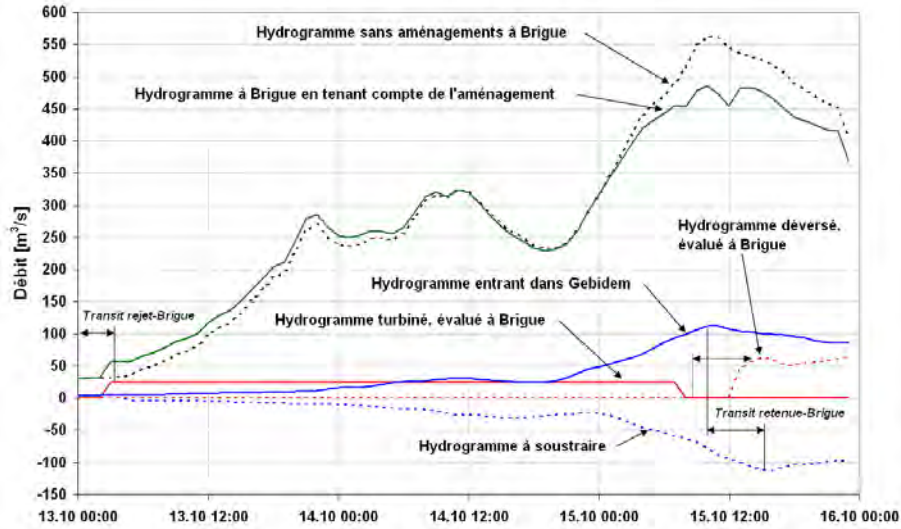


Figure 6.1 : Schéma de la méthode d'estimation de l'hydrogramme aval: exemple de l'aménagement de la Massa évalué à Brigue.

Version opérationnelle du programme d'optimisation

Présentation de l'outil

L'outil d'optimisation des opérations préventives a été amélioré en plusieurs étapes. Dans sa version actuelle, il considère toujours les 10 principaux aménagements hydroélectriques et effectue une optimisation multi-objectifs selon une évaluation économétrique. Il exploite les prévisions hydrologiques calculées par le modèle RSII ainsi que les hydrogrammes sans aménagements à 7 points de contrôle (objectifs) programmés. Sur cette base, il fournit une consigne de turbinage, de pompage et d'utilisation des vidanges de fond qui peut être testée et validée par une nouvelle simulation RSII.

Objectifs et points de contrôle

L'objectif de l'optimisation est la minimisation des coûts liés à l'événement de crue. Ils sont calculés localement pour chaque aménagement et sont évalués à partir des hydrogrammes aux 7 points de contrôle présentés à la figure 6.2.

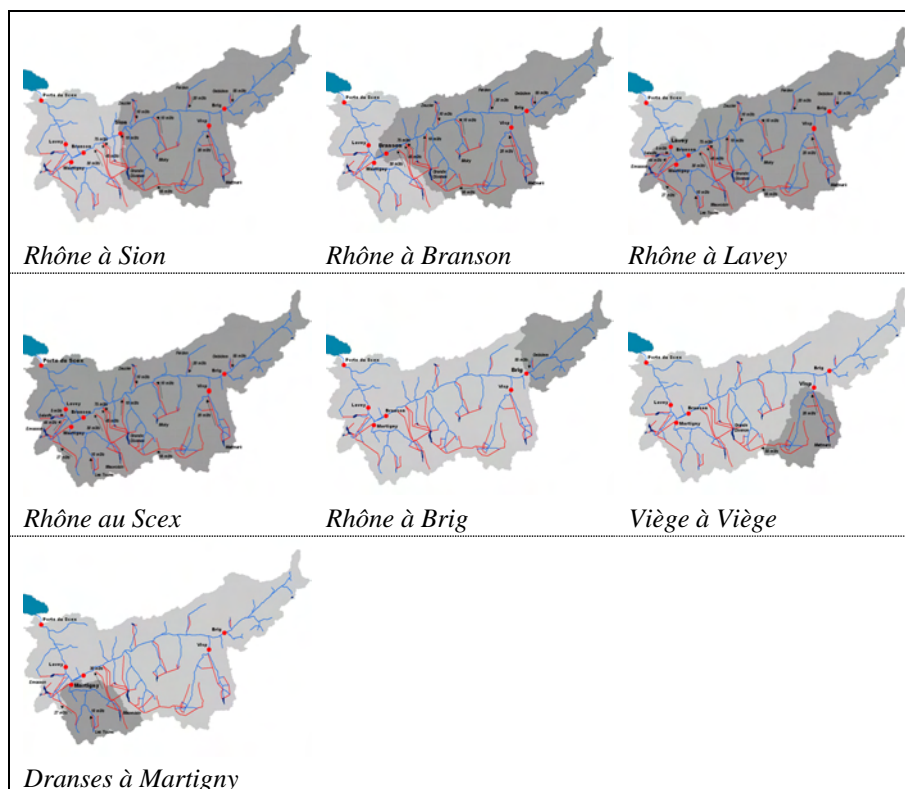


Figure 6.2 : Présentation des 7 points de contrôle programmés dans la version opérationnelle de l'outil d'optimisation.

Une consigne de gestion des aménagements est fournie pour chaque point de contrôle. La consigne globalement optimale est celle fournie pour la Porte du Scex, qui considère les coûts localement et aux 7 points de contrôle simultanément.

Fonctions de coût

Différentes fonctions de coût ont été implémentées dans le programme à différents niveaux. Elles sont actuellement provisoires quant aux valeurs appliquées, mais permettent de se faire une bonne idée de la logique d'optimisation. Les fonctions de coût locales sont décrites ci-dessous :

- Coût du déversement ou de la vidange : fonction du débit maximum dans la rivière à l'aval de la retenue, fonction quadratique à seuil. Objectif : limiter le débit dans la rivière à l'aval de la retenue et donc limiter l'usage de la vidange de fond et de l'évacuateur de crue.
- Coût du volume perdu : coût du volume d'eau perdu par déversement, coût unitaire par m^3 . Objectif : favoriser une évacuation du débit par turbinage plutôt que par déversement, opération toujours plus risquée.
- Coût d'une restriction de turbinage : coût du kWh (selon programme d'exploitation) promis mais non produit. Il s'agit d'un coût virtuel en pratique, car sans déversement ou vidange de la retenue, ce kWh sera vendu à un autre moment après la crue.
- Revenu d'un turbinage supplémentaire non prévu : revenu (tarif minimum) du kWh produit hors programme d'exploitation en cas de retenue pleine à la fin de la crue. Cette production aurait sinon été perdue par déversement.

Les fonctions de coût globales sont décrites ci-dessous :

- Coût d'un excédent de débit au point de contrôle : fonction du débit maximum dans la rivière au point de contrôle, fonction quadratique à seuil. Objectif : limiter le débit dans la rivière (Rhône, Viège ou Dranse) à une valeur acceptable.
- Coût global de la crue : somme de tous les coûts mentionnés ci-dessus. Considère également les coûts aux 7 points de contrôle simultanément.

Les valeurs seuil choisies sont présentées dans le tableau 7.1. Il s'agit des débits seuil qui, s'ils sont dépassés, conduisent à des coûts dans le calcul de l'optimisation. Ces valeurs correspondent à la capacité du Rhône le long des tronçons considérés à l'aval du point de contrôle.

Des valeurs seuils sont également implémentées à l'aval des barrages afin d'encourager le modèle à réduire les déversements et vidanges au minimum. Ces valeurs correspondent à la capacité des affluents juste à l'aval du barrage.

A titre d'exemple, la fonction de coût des dégâts aux points de contrôle est exprimée à Sion. Soit un débit de pointe simulé de $840 \text{ m}^3/\text{s}$. Le coût associé à ce débit sur ce tronçon vaudra (équ. 7.3) :

$$\text{Coût} = (840 - 800)^2 \cdot 30 = 48000 \text{ kCHF} \quad (7.3)$$

Le coût est donc fonction du carré du dépassement de débit, multiplié par un coefficient constant de 30. Il est exprimé en kCHF. L'équation 7.4 présente l'exemple du coût du déversement par-dessus la digue de Mattmark (dégâts dans le cours d'eau à l'aval de l'ouvrage). Soit un débit déversé de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, la capacité de la Viège à l'aval de l'ouvrage étant fixée à $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

$$\text{Coût} = (50 - 25)^2 \cdot 0.577 = 360 \text{ kCHF} \quad (7.4)$$

A nouveau, le coût est proportionnel au carré du dépassement de débit. Le coefficient multiplicateur est beaucoup plus faible (environ 60 fois). Cela permet à l'optimisation d'accorder une priorité aux coûts des débordements dans le Rhône. En conséquence, il permettra plus facilement aux ouvrages de déversement et de vidange de fonctionner.

Tableau 7.1 : Débits seuils implémentés dans le modèle d'optimisation des opérations préventives des aménagements hydroélectriques.

Points de contrôle	Valeur seuil (m^3/s)	Aménagement hydroélectrique	Affluent	Valeur seuil (m^3/s)
Brigue Rhône	600	Grande Dixence	Borgne	20
Viège (Viège)	300	Mauvoisin	Dranse Bagnes	30
Martigny (Dranses)	200	Emosson	Trient	20
Sion	800	Moiry	Navisence	0
Branson	1000	Mattmark	Viège Saas	25
Martigny (Rhône)	1200	Salanfe	Salanfe	20
Porte du Scex	1400	Bitsch	Massa	40
		Lienne	Lienne	15
		Pallazuit	Dranse Entremont	35
		Lötschen	Lonza	40

Enfin, les coûts liés aux pertes d'exploitation sont encore plus faibles que les coûts des dégâts aux affluents du Rhône. Il convient de noter que les coûts des pertes d'eau pour turbinage préventif inutile, suite à une erreur de prévision hydrologique, ne peuvent pas être calculés avant la crue. Ils ne peuvent être calculés qu'après l'événement passé en comparant le niveau de la retenue qui aurait été atteint sans turbinage préventif et le niveau réellement mesuré. Ce coût pourrait être estimé si des prévisions probabilistes étaient disponibles, ce qui n'est pas le cas en 2007.

Validation de la méthode d'optimisation

Procédure de validation

La méthode d'optimisation a été validée par comparaison entre hydrogrammes évalués lors de l'optimisation et hydrogrammes simulés à l'aide de *Routing System II*. Les volumes ruisselés aux sous-bassins versants ont été simulés avec RSII, tout comme les hydrogrammes entrant dans les retenues et les hydrogrammes sans aménagements aux points de contrôle. Sur la base de ces données, l'optimisation multi-objectifs a été effectuée et les hydrogrammes aux points de contrôle ont été évalués. Ces derniers ont été comparés avec les hydrogrammes simulés considérant les consignes optimales de gestion des aménagements.

Crue de septembre 1993

L'événement de crue de septembre 1993 a été considéré du 20.09.1993 au 27.09.1993, mais l'optimisation a été effectuée sur 72 heures, du 22.09.1993 à 12h00 au 25.09.1993 à 12h00.

Les résultats synthétisés au tableau 7.2 montrent la performance de la nouvelle méthode d'évaluation des hydrogrammes à l'aval des aménagements. Les différences entre simulations et calculs d'évaluation sont en effets toujours inférieures à $18 \text{ m}^3/\text{s}$, soit une erreur maximum de l'ordre de 2%. Cette erreur est faible en regard de l'incertitude liée aux prévisions et au modèle hydrologique, ce qui justifie la décision de ne pas effectuer de simulations en phase d'optimisation.

Tableau 7.2 : Synthèse des débits de pointe observés, simulés et évalués par calcul lors de la crue de septembre 1993.

Point de contrôle	Date	max. Débit sans HPP [m ³ /s]	max. Débit observé [m ³ /s]	max. Rejets observés [m ³ /s]	max. Débit simulation [m ³ /s]	max. Rejets simulation [m ³ /s]	max. Débit calculé [m ³ /s]	max. Rejets calculés [m ³ /s]
Brig	24.09.1993 20.00	457	443	57	386	0	386	0
Viège (Viège)	24.09.1993 17.00	401	324	19	295	1	302	0
Martigny (Dranses)	24.09.1993 18.00	163	75	13	63	0	66	0
Sion	24.09.1993 21.00	949	820	115	697	26	686	0
Branson	24.09.1993 23.00	1009	920	157	753	27	750	0
Martigny (Rhône)	24.09.1993 23.00	1141	967	173	794	35	776	0
Léman	25.09.1993 04.00	1220	1082	182	906	37	898	0

La figure 6.3 présente la comparaison entre les différents hydrogrammes observés, sans aménagements hydroélectriques, estimés et simulés avec RSII. Quelques commentaires s'imposent: tout d'abord, la réduction du débit de pointe observée en 1993 grâce aux aménagements hydroélectriques est remarquable, sauf à Brigue. Cela confirme que les aménagements ont eu un effet protecteur lors de cet événement de crue. Ensuite, cette réduction de débit observée est inférieure à la réduction de débit optimale et aurait pu être doublée par des manœuvres préventives adéquates. Enfin, la concordance entre hydrogrammes estimés avec la méthode d'optimisation et hydrogrammes simulés avec RSII est excellente.

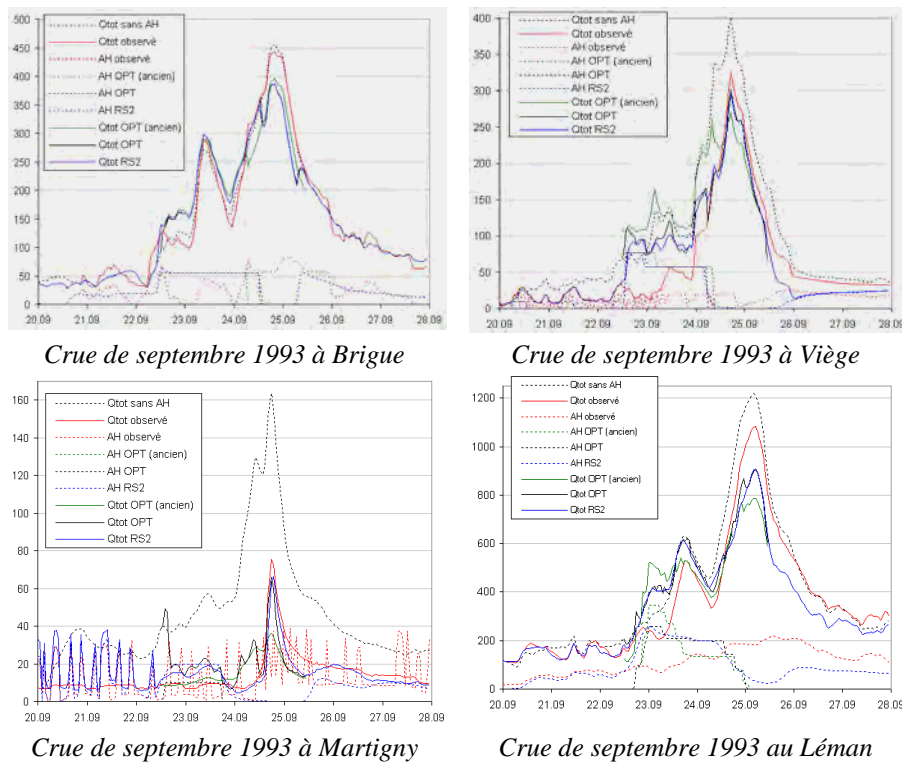


Figure 6.3 : Comparaison entre hydrogrammes sans aménagements, observés, estimés (ancienne méthode), estimés (méthode actuelle) et simulés avec RSII pour la crue de septembre 1993. Le débit total dans le cours d'eau (Qtot) et la somme des rejets (AH) sont présentés en quatre points du réseau.

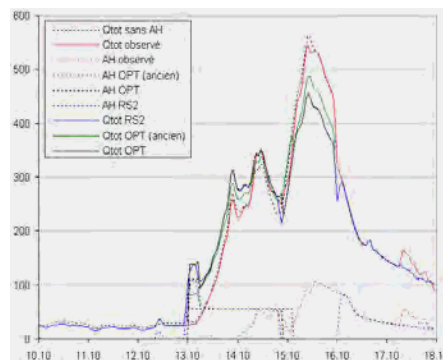
Crue d'octobre 2000

L'événement de crue d'octobre 2000 a été considéré du 10.10.2000 au 17.10.2000, mais l'optimisation a été effectuée sur 72 heures, du 13.10.2000 à 00h00 au 16.10.2000 à 00h00.

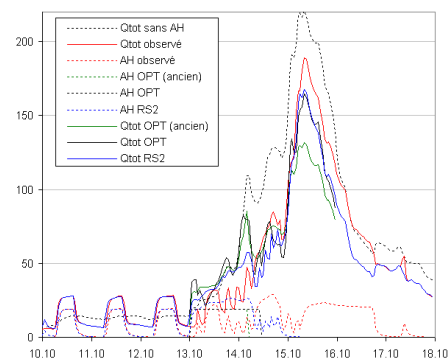
Les résultats synthétisés au tableau 7.2 confirment la performance de la méthode d'évaluation des hydrogrammes à l'aval des aménagements. Les différences entre simulations et calculs sont en effets toujours inférieures à $14 \text{ m}^3/\text{s}$ (débit de pointe), soit une erreur maximum de l'ordre de 1%. Les hydrogrammes présentés à la figure 6.4 confirment les commentaires émis précédemment pour la crue de septembre 1993.

Tableau 7.2 : Synthèse des débits de pointe observés, simulés et évalués par calcul lors de la crue d'octobre 2000.

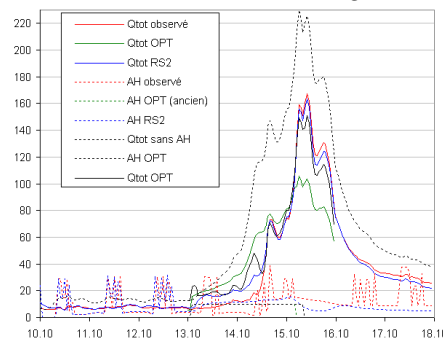
Point de contrôle	Date	Débit max. sans HPP [m ³ /s]	Débit max. observé [m ³ /s]	Rejets max. observés [m ³ /s]	Débit max. simulation [m ³ /s]	Rejets max. simulation [m ³ /s]	Débit max. calculé [m ³ /s]	Rejets max. calculés [m ³ /s]
Brig	15.10.2000 10.00	563	544	88	456	0	457	0
Viège (Viège)	15.10.2000 08.00	221	189	17	168	0	165	0
Martigny (Dranses)	15.10.2000 06.00	230	159	15	156	10	149	10
Sion	15.10.2000 13.00	972	897	202	761	71	747	0
Branson	15.10.2000 15.00	1039	976	222	784	47	785	0
Martigny (Rhône)	15.10.2000 16.00	1239	1128	160	976	74	977	0
Léman	15.10.2000 14.00	1508	1358	202	1185	81	1187	0



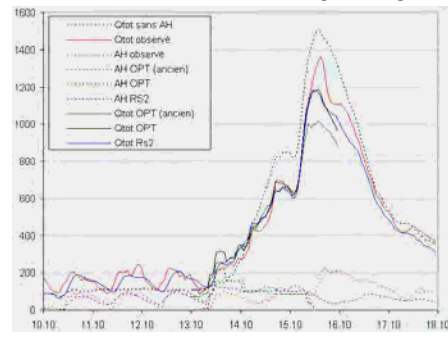
Crue d'octobre 2000 à Brigue



Crue d'octobre 2000 à Viège (Viège)



Crue d'octobre 2000 à Martigny (Dranses)



Crue d'octobre 2000 au Léman

Figure 6.4 : Comparaison entre hydrogrammes sans aménagements, observés, estimés (ancienne méthode), estimés (méthode actuelle) et simulés avec RSII pour la crue d'octobre 2000. Le débit total dans le cours d'eau (Qtot) et la somme des rejets (AH) sont présentés en quatre points du réseau.

Chapitre 7

Performance du système

Le système MINERVE est constitué du modèle de simulation construit avec *Routing System II* et de l'outil d'aide à la décision pour l'optimisation de la régulation des aménagements hydroélectriques lors des crues. Ce système requiert une infrastructure informatique puissante, actuellement en cours de développement. Cette dernière n'est pas décrite ici car la structure définitive des moteurs d'acquisition des données, des bases de données et des modules de publication des résultats ne sont pas définitivement établis.

La performance du système a toutefois été analysée suite à l'utilisation du système en situation quasi-opérationnelle. Les mesures en temps réel ainsi que les prévisions météorologiques ont été exploitées lors de scénarios de crue (1987, 1993, 2000) et toutes les étapes de la prise de décision ont été réalisées, puis implémentées dans le modèle. Ce processus a permis de mettre en évidence l'efficacité du système d'un point de vue théorique, puisque les décisions proposées par le modèle ont été implémentées, alors qu'en situation réelle, d'autres décisions pourraient être prises.

Ce chapitre présente le fonctionnement général du système MINERVE ainsi que sa performance théorique.

Contenu

- Concept de fonctionnement du système MINERVE
- Performance théorique du système lors de scénarios de crue
- Recommandations en situation de crise

Concept de fonctionnement de MINERVE

Fonctionnement du système à haut niveau

Le fonctionnement à haut niveau du modèle de gestion des crues peut être décrit par quatre fonctions principales (figure 7.1). La première fonction est l'acquisition des données chez les fournisseurs et leur archivage dans une base de données centrale, colonne vertébrale de tout le système. La deuxième fonction est le calcul de la prévision hydrologique (les sens du système), la troisième étant l'optimisation des opérations préventives (le cerveau). Finalement, la dernière fonction est la publication des résultats aux différents clients du système (la parole).

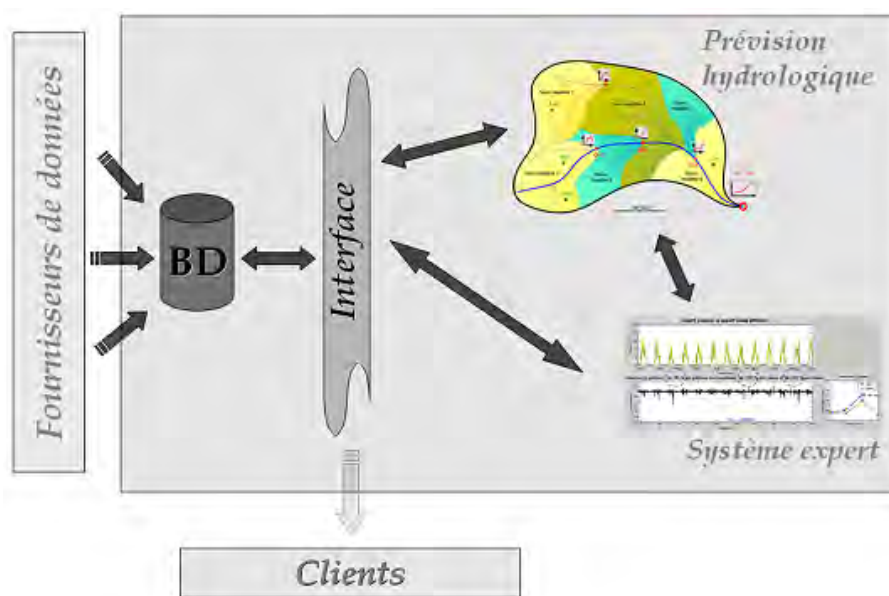


Figure 7.1 : Fonctionnement à haut niveau du modèle de gestion des crues.

Les fournisseurs de données sont les différents partenaires du projet, à savoir MétéoSuisse pour les prévisions météorologiques et les mesures hydro-météorologiques (complétées par les mesures du réseau IMIS appartenant aux cantons), l'Office Fédéral de l'Environnement pour les mesures de débit dans les cours d'eau et les gestionnaires des aménagements hydroélectriques pour les mesures associées. Toutes ces données suffisent à effectuer un bilan de la situation hydrologique du bassin versant, de la situation des aménagements hydroélectriques et une évaluation de la situation hydrologique future (Jordan et al., 2006).

Les résultats issus de ce système sont d'une part les prévisions hydrologiques et d'autre part le programme des opérations préventives

recommandées par le modèle. Les clients du système que sont les responsables de la sécurité civile ainsi que les gestionnaires des aménagements hydroélectriques sont ainsi associés aux résultats et responsabilisés (Boillat, 2005).

Fonctionnement du modèle de prévision hydrologique

Le modèle de prévision hydrologique s'approvisionne dans la base de données et utilise trois types de données (figure 7.2) : les mesures hydro-météorologiques et les mesures des aménagements hydroélectriques (données de commande) permettent de simuler les écoulements jusqu'à l'heure actuelle, les mesures de débit (données de contrôle) permettent d'effectuer un filtrage du modèle hydrologique, améliorant momentanément ses conditions initiales, et enfin les prévisions météorologiques quantitatives qui sont indispensables pour l'établissement d'une prévision hydrologique à court terme (72 heures).

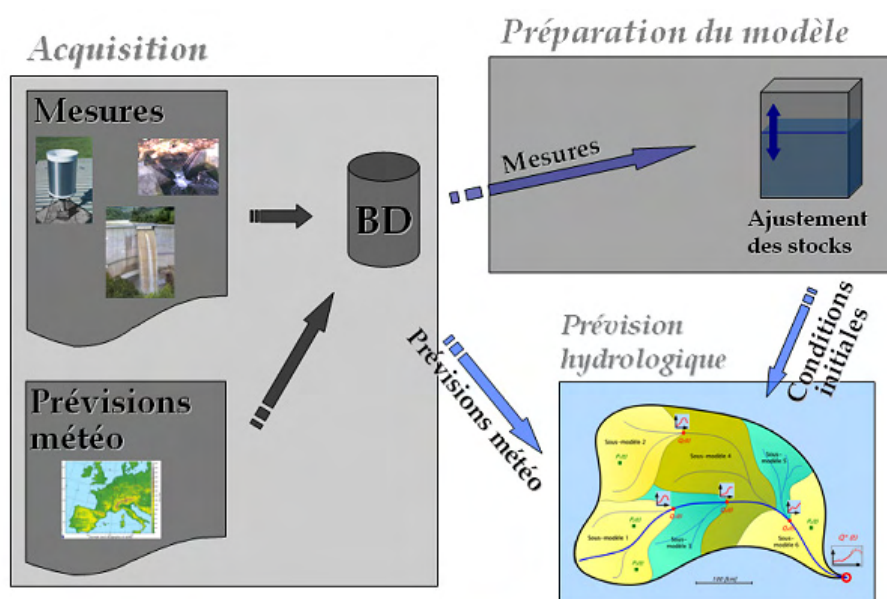


Figure 7.2 : Fonctionnement opérationnel du modèle de prévision hydrologique.

En fonctionnement opérationnel, deux prévisions hydrologiques sont effectuées : la première tient compte de tous les paramètres du modèle et fournit le débit prévu en tout point du bassin versant, tandis que la deuxième, soumise aux mêmes conditions initiales et de bord, ne considère pas l'influence des retenues et de leurs ouvrages annexes, fournissant donc le débit prévu sans influence des aménagements hydroélectriques.

Fonctionnement du modèle d'optimisation

Le modèle d'optimisation des opérations préventives des aménagements hydroélectriques se nourrit également de nombreuses données fournies par le modèle hydrologique et la base de données (figure 7.3). Les hydrogrammes aux points de contrôle (pour information uniquement) ainsi que les hydrogrammes entrant dans les retenues sont directement tirés du modèle hydrologique. Les hydrogrammes sans aménagements sont tirés du deuxième modèle de prévision et sont également nécessaires au calcul d'optimisation, tout comme les volumes ruisselés sur tous les sous-bassins versants du modèle.

Exploitant les données selon la méthode décrite au chapitre 7, l'outil d'optimisation calcule les opérations préventives optimales pour différentes fonctions objectives ou points de contrôle. Une différence avec le modèle théorique subsiste cependant : les règlements d'urgence des aménagements hydroélectriques ont été implémentés dans l'outil d'optimisation. Les règles d'urgence sont les mêmes que celles implémentées dans le modèle de simulation *Routing System II* et sont considérées comme rigides : elles ne peuvent par conséquent pas être modifiées par l'outil d'optimisation. Les consignes d'exploitation optimisées sont ensuite automatiquement renvoyées au modèle hydrologique et une simulation de validation est effectuée, qui permet de comparer les hydrogrammes calculés par le modèle d'optimisation avec ceux simulés à l'aide du modèle hydrologique *Routing System II*.

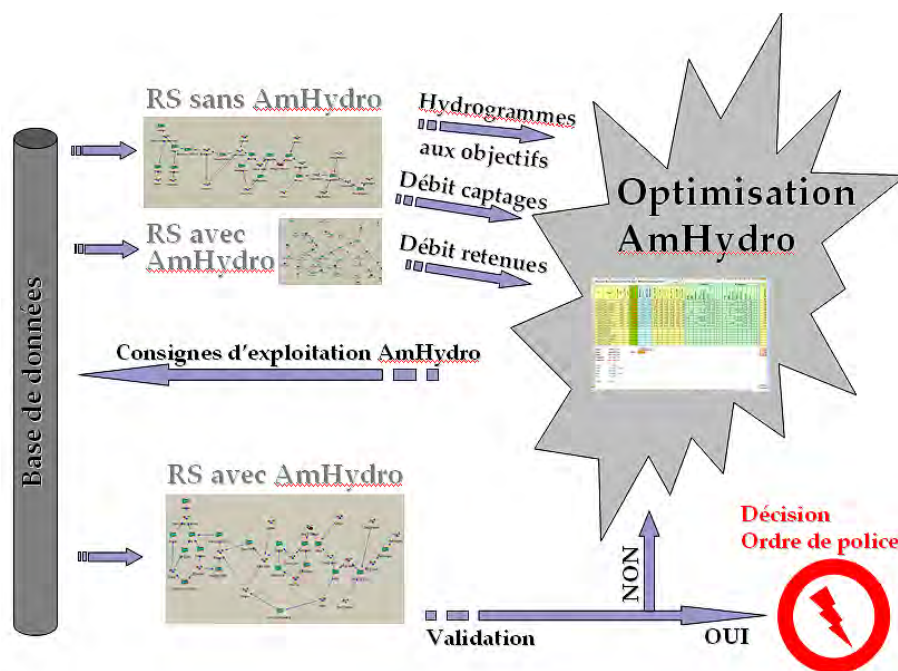


Figure 7.3 : Fonctionnement du modèle d'optimisation des opérations préventives.

Si les hydrogrammes calculés (modèle d'optimisation) et simulés (modèle de simulation) sont similaires, le processus complet a correctement fonctionné et des décisions peuvent être prises en toute objectivité.

Technologies utilisées

En août 2007, l'état d'avancement du projet MINERVE était le suivant:

- opérationnel : modèle d'acquisition et de spatialisation des prévisions météorologiques, outil *Microsoft VB.NET*
- opérationnel : modèles hydrologiques avec et sans aménagements incluant procédure de filtrage, programme *Routing System II*, version 1.301 en environnement *Microsoft VB.NET*
- opérationnel : outil d'optimisation des opérations préventives incluant procédures automatiques d'acquisition des données et exportation des résultats, classeur *Microsoft Excel 2003* et routines *Visual Basic*
- non opérationnel : acquisition automatique et en temps réel des mesures hydro-météorologiques (précipitations, températures, ETP, débits).

Il était en l'état possible de réaliser des prévisions hydrologiques et de déterminer les consignes d'exploitation en situation de crue, mais la procédure de filtrage du modèle hydrologique ne pouvait être appliquée en raison du manque de mesures hydro-météorologiques en temps réel.

Performance théorique du système lors de scénarios de crue

Crue de septembre 1993

Ce chapitre traite du processus de décision tout au long d'un événement de crue durant plusieurs jours et de l'impact des décisions prises sur la protection du bassin versant. L'analyse est appliquée à la crue de septembre 1993 et les prises de décisions se sont déroulées comme suit :

1. Prévision du 22.09.93 à 12h et décision
2. Prévision du 23.09.93 à 00h et décision
3. Prévision du 23.09.93 à 12h et décision
4. Prévision du 24.09.93 à 00h et décision
5. Mise à jour du 24.09.93 à 06h et décision
6. Prévision du 24.09.93 à 12h et décision
7. Mise à jour du 24.09.93 à 15h et décision
8. Mise à jour du 24.09.93 à 18h et décision
9. Mise à jour du 24.09.93 à 21h et décision

Les variables liées aux aménagements hydroélectriques peuvent être consultées dans *Jordan, 2007*. Les principaux indicateurs sont le niveau et le volume disponible qui représentent l'état actuel de la retenue principale de chaque aménagement, le volume de turbinage préventif et le volume entrant qui permettent de déterminer le nouvel état actuel lors de la période de simulation suivante. Le volume de turbinage préventif est de plus l'indicateur de la décision prise pour un aménagement.

Il est ensuite nécessaire de comparer les hydrogrammes *observés*, *optimaux* et *opérationnels* pour déterminer la performance du système d'aide à la décision. Les hydrogrammes *optimaux* correspondent aux opérations préventives optimales à prévisions parfaites tandis que les hydrogrammes *opérationnels* correspondent aux opérations préventives qui auraient effectivement pu être effectuées avec l'information prévisionnelle disponible. La figure 7.4 illustre les différents hydrogrammes et rejets à la Porte du Scex en fonction de l'information disponible.

Les résultats indiquent que sur la base des prévisions hydro-météorologiques réelles, les décisions conduisant à une consigne optimale auraient été prises. En effet, les décisions de turbiner dès le 22.09.1993 à 12h sur Grande Dixence, Mauvoisin, Gougra, Mattmark, Bitsch, Pallazuit et Lötschen étaient adéquates. Cela aurait permis l'arrêt des opérations préventives dès le 24.09.1993 à 15h (basé sur l'analyse des mesures de débit) et la protection maximale du Rhône et de ses principaux affluents pendant la pointe de la crue (nuit du 24 au 25.09.1993).

Dans ce cas, la performance opérationnelle du système d'aide à la décision est conforme à sa performance théorique.

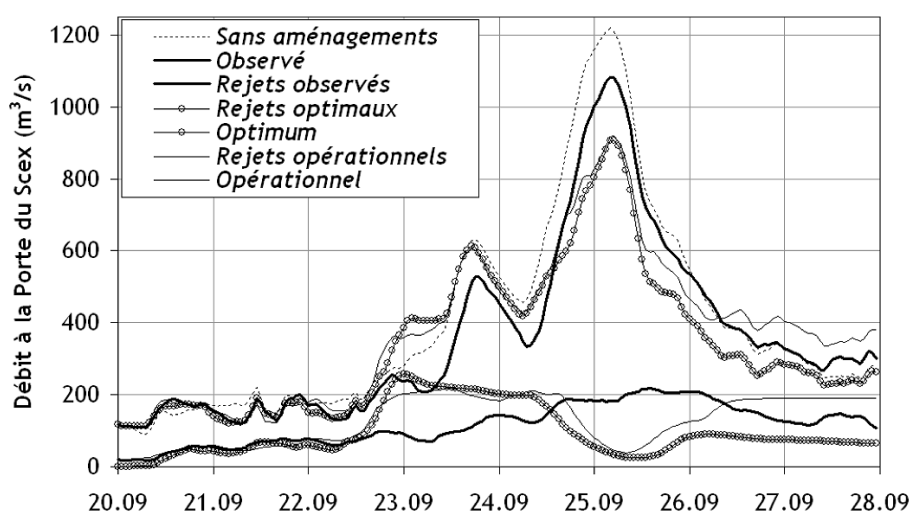


Figure 7.4 : Performance opérationnelle, crue 1993. Comparaison entre hydrogrammes et rejets sans aménagements, observés, optimaux et opérationnels.

Crue d'octobre 2000

Ce chapitre présente l'analyse de l'événement de crue d'octobre 2000 du point de vue de la gestion des aménagements hydroélectriques en se concentrant sur la performance opérationnelle du modèle d'aide à la décision. L'analyse a de nouveau été effectuée en admettant une prévision hydrologique réelle, c'est-à-dire obtenue avec des re-simulations des intempéries par le modèle COSMO-CH7 sur la base des conditions de bord provenant du modèle ECMWF. Les étapes de simulation et de décisions se sont déroulées comme suit :

1. Prévision du 13.10.00 à 00h et décision
2. Prévision du 13.10.00 à 12h et décision
3. Prévision du 14.10.00 à 00h et décision
4. Prévision du 14.10.00 à 12h et décision

5. Prévision du 15.10.00 à 00h et décision
6. Mise à jour du 15.10.00 à 06h et décision
7. Prévision du 15.10.00 à 12h et décision

A nouveau, les variables liées aux aménagements hydroélectriques sont disponibles dans *Jordan, 2007*. Pour rappel, les décisions ont été prises dans cette analyse sur la base des prévisions hydrologiques (incluant les prévisions météorologiques), mais la situation des aménagements à la fin de chaque période de 12h a été évaluée en fonction des volumes effectivement entrés dans les retenues, conformément à ce qui se passerait en réalité.

Les résultats indiquent que lors de la crue d'octobre 2000 seuls 4 aménagements devaient effectuer un abaissement préventif du plan d'eau. Il s'agissait des aménagements de Mattmark (KWM), Bitsch (EM), Lötschen (KWL) et dans une moindre mesure Pallazuit (GSB). Le turbinage effectué suffisamment tôt à partir de ces retenues permettait alors de garantir un remplissage optimal à la fin de la crue tout en assurant la protection des cours d'eau situés à l'aval. Seule la retenue de Ferden (aménagement de Lötschen) était en situation de surverse à partir du 15.10.2000 à 02h, son volume de stockage total étant relativement peu important (1.7 Mio m³).

Sur la base des observations, d'autres décisions pouvaient être prises qui assuraient la réduction du débit dans le Rhône : dès le 15.10.2000 à 06h, il était indispensable d'arrêter toute production d'électricité sur les aménagements dont le volume de stockage résiduel était suffisant (ce qui n'a pas systématiquement été fait lors de la crue). Il s'agissait alors de Grande Dixence (GD), Mauvoisin (FMM), Emosson (ESA), Gougria (FMG), Salanfe (Sal) et Lienne (EL), en plus des aménagements de Mattmark et Bitsch, dont les niveaux avaient été suffisamment abaissés. Dès le 15.10.2000 à 12h, il était encore possible d'arrêter la production à Pallazuit.

Finalement, la crue étant passée à Sion le 15.10.2000 dans la soirée, il était possible de relaxer totalement les contraintes sur les aménagements dès le 16.10.2000 à 00h. Le résultat de la gestion des aménagements hydroélectriques sur la base du système d'aide à la décision est présenté à la figure 7.5. Les hydrogrammes sans aménagements, observé, optimal et opérationnel sont présentés à la Porte du Scex, en plus des rejets observés, optimaux et opérationnels. La réduction observée du débit de pointe grâce à l'influence des aménagements hydroélectriques était de 150 m³/s. Elle aurait pu être de 306 m³/s (opérationnel), proche de la réduction optimale de 322 m³/s. Dans ce cas, le système d'aide à la décision aurait donc permis de doubler l'effet protecteur des aménagements hydroélectriques.

L'ampleur de ce résultat s'explique par l'analyse des rejets. En effet, les rejets observés étaient de $223 \text{ m}^3/\text{s}$ à la Porte du Scex pendant le passage de la pointe de la crue (15.10.2000 à 17h), alors que les rejets opérationnels auraient été de $63 \text{ m}^3/\text{s}$. On retrouve ici une différence de $160 \text{ m}^3/\text{s}$ entre rejets observés et opérationnels.

Tout comme lors de la crue de septembre 1993, l'application de principes simples sur la base d'une prévision quantitative de volumes entrant dans les retenues aurait permis une gestion quasi-optimale des aménagements hydroélectriques lors de la crue et une réduction significative des dégâts dans les cours d'eau aval.

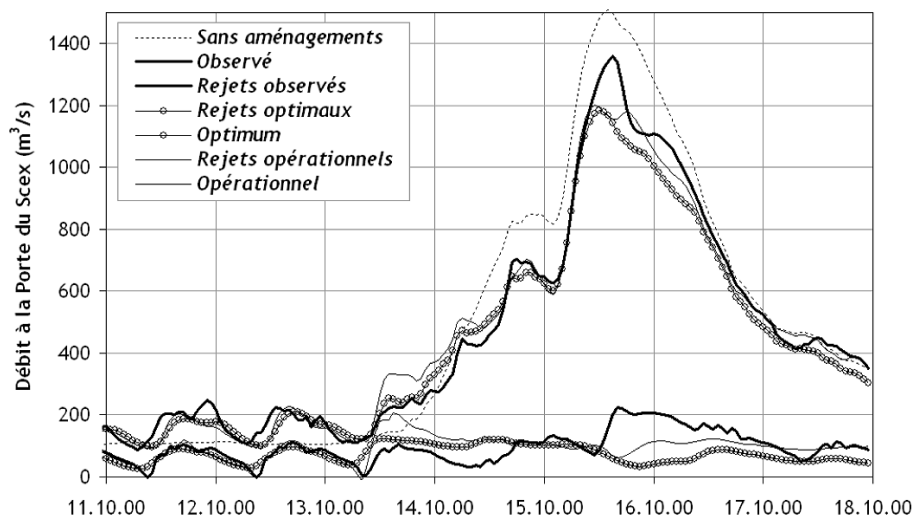


Figure 7.5 : Performance opérationnelle, crue 2000. Comparaison entre hydrogrammes et rejets sans aménagements, observés, optimaux et opérationnels lors de la crue d'octobre 2000.

Recommandations en situation de crise

Le système MINERVE fournit des informations très intéressantes en situation de crise. En premier lieu, la collecte des informations disponibles permet d'obtenir une vision synthétique de la situation globale du bassin versant, tant du point de vue des cours d'eau que des aménagements hydroélectriques.

En second lieu, l'analyse des prévisions météorologiques et hydrologiques permet d'évaluer l'évolution future probable de la situation. En particulier, cela permet de déterminer quels seront les régions probablement les plus touchées et quand se produiront les débits maximaux.

Enfin, l'outil d'aide à la décision permet de déterminer quels sont les moyens les plus efficaces pour contrôler les débits à l'aval des retenues d'accumulation. De plus, des informations sur les délais

nécessaires à l'optimisation des opérations de vidange préventive sont fournies.

L'exploitation de ce système aurait pu permettre une amélioration significative de la situation lors des crues de 1993 et 2000, pour autant que les décisions proposées par le système aient pu être prises. Il convient cependant, de rappeler que de très fortes incertitudes entachent la performance globale du système de prévision et de gestion des crues.

Dans le processus de décision, de nombreuses analyses doivent être effectuées parallèlement à l'exploitation du système MINERVE. Tout d'abord, dès qu'une alerte est émise par MétéoSuisse, il est indispensable de se renseigner par téléphone auprès des météorologues afin de comprendre les processus météorologiques en cours. Il est également utile de comprendre pourquoi le modèle numérique COSMO-CH7 fournit certaines valeurs et quelle est leur plausibilité. Cela permet déjà d'avoir une estimation de la probabilité d'occurrence de la prévision météorologique.

Ensuite, lors de la simulation hydrologique, il est nécessaire d'analyser de manière détaillée les processus de formation du débit, selon une double grille de lecture. Les processus sont-ils liés à la température (fonte de neige, fonte de glace), aux conditions antécédentes d'humidité (forte saturation du sol suite à une période de fonte ou d'intempéries) ou aux fortes précipitations uniquement. Dans ce dernier cas, l'incertitude est également la plus importante puisqu'elle dépend uniquement des quantités de précipitations prévues, en général peu fiables. Il est en outre nécessaire de déterminer quelles régions contribuent le plus à la formation du débit dans le Rhône. Cela permet d'une part de comparer avec des situations passées et d'évaluer la plausibilité d'une nouvelle situation, et d'autre part d'immédiatement examiner l'influence d'une retenue d'accumulation située dans la région.

Il est en particulier important de vérifier la plausibilité des conditions initiales du modèle hydrologique (saturation du sol, débit de base glaciaire, hauteur de neige sur certaines bandes d'altitude), qui sont soit obtenues à la suite d'une simulation continue sur une période de plusieurs mois, soit à la suite de la mise à jour des variables d'état du modèle. Une analyse de sensibilité sur ces valeurs peut permettre de mieux cerner leur influence dans la formation de la crue.

Enfin, une analyse grossière des volumes disponibles dans les retenues et des apports prévus permet d'estimer si des opérations préventives urgentes sont nécessaires ou s'il est possible d'attendre.

Ces analyses, effectuées en tout temps en situation de crue ou d'avant-crue, doivent impérativement être complétées par une comparaison entre processus et quantités prévues, et processus et quantités observées. Les questions à se poser sont :

- A-t-il commencé à pleuvoir avant ou après l'heure prévue ? (adéquation de la temporalité des prévisions)
- A-t-il plu dans les régions prévues ? (adéquation de la spatialité des prévisions)
- A-t-il plu les quantités prévues ? (adéquation de l'intensité des prévisions)
- Les températures prévues se sont-elles effectivement réalisées ? (influence de l'isotherme sur les chutes de neige et sur la fonte)
- Les processus prévus sont-ils effectivement en train de se produire ou la situation observée diverge-t-elle fortement de celle imaginée ?
- Les aménagements hydroélectriques sont-ils réellement en mesure d'effectuer des opérations de vidange préventive ?

Répondre à ces différentes questions dès qu'une nouvelle prévision est disponible permet de relativiser ses résultats, ainsi que la nécessité d'opérations de vidange préventive des retenues d'accumulation. En effet, si les précipitations prévues ne se réalisent pas tout de suite, il n'est pas impératif de se placer en situation d'urgence et il est possible d'attendre avant d'abaisser le niveau des retenues d'accumulation. Si les précipitations ne se produisent pas dans les régions prévues, alors il faut se poser la question de l'utilité de certaines opérations sur les aménagements hydroélectriques.

Si au contraire les intempéries se produisent en avance ou à l'heure prévue, alors les doutes peuvent se dissiper et il convient d'agir rapidement. Les analyses ont en effet montré qu'une période de 24-30h avant la pointe de la crue était nécessaire pour permettre une gestion optimale des retenues.

Enfin, il convient de rappeler qu'une mesure extrêmement efficace pour la réduction des débits de pointe dans le Rhône est l'arrêt immédiat des turbines et des déversements juste avant la pointe de la crue (1-2 heures selon l'aménagement). Cela n'est pas toujours possible mais doit être réalisé si les niveaux des retenues le permettent. Cette décision n'est pas prise sur la base de prévisions mais bien des observations et n'est donc pas entachée d'incertitudes.

Bibliographie

André S., Boillat J.-L. (2002). Schaffung eines Rückhaltevolumens im Stausee Mattmark für den Hochwasserschutz, Proc. Int. Symposium 7. – 9. Oktober: Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, pp. 509 – 518, VAW, ETH, Zürich, Switzerland

Arborino, T. (2000). 3e Correction du Rhône – Sécurité pour le futur, Rapport de synthèse, Département des Transports, de l'Équipement et de l'Environnement – Canton du Valais

Bérod, D. et Consuegra, D. (1995). Etude CONSECRU, Traitements statistiques des séries de débit, Rapport non publié, Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Bianco, P., Genolet, F., Rebord, Y.G. (1999). La 2ème correction a-t-elle résolu le problème du charriage ? Wasser, Energie, Luft – Eau, énergie, air, 3/4, Baden, Suisse

Biedermann, R., Pougatsch, H., Darbre, G., Raboud, P.-B., Fux, C., Hagin, B., et Sander, B. (1996). Aménagements hydroélectriques à accumulation et protection contre les crues. Speicherkraftwerke und Hochwasserschutz, Wasser, Energie, Luft – Eau, énergie, air, 10, 221-266

Boillat, J.-L., Jaberg, P. (2001). Modélisation des crues du Rhône en Valais. Événement d'octobre 2000, Proc. Conférences du 25e anniversaire du GC à l'EIVD, 14 juin, pp. 41 – 49, Yverdon-les-Bains, Suisse

Boillat J.-L., Dubois J., Schleiss A., Jordan F. (2002a). Flood Modelling and Prevention in the Rhone basin upstream of lake Geneva, Proc. International Conference on Flood estimation, March 6-8, pp. 389–395, Bern, Switzerland

Boillat, J.-L., Jordan, F., Ulrich, D., Hingray, B., Hamdi, Y. (2002b). MINERVE, a Tool for Prediction and Management in Valais, Proc. Int. Conférence IUKB, October, Sion, Switzerland

Boillat, J.-L., Dubois, J., Schleiss, A. (2000c). Utilisation possible de la retenue de Mattmark pour la protection contre les crues et la production d'énergie, Actes du XX Congrès des Grands Barrages, CIGB/ICOLD, Q.77 – R.23, pages 339-355, Beijing, China

Boillat, J.-L. (2005). L'influence des retenues valaisannes sur les crues - Le projet MINERVE, Communication LCH N°21, Conférence sur la recherche appliquée en relation avec la 3e Correction du Rhône - Nouveaux développements dans la gestion des crues, éd. A. Schleiss, Martigny, pp. 87–101.

Consuegra, D., Niggli, M. et Musy, A. (1998). Concepts méthodologiques pour le calcul des crues. Application au bassin versant supérieur du Rhône, *Wasser Energie Luft – Eau Energie Air* 9/10 : 223–231.

Dubois, J., Boillat, J-L. (2000). Routing System – Modélisation du routage de crues dans des systèmes hydrauliques à surface libre, Communication 9, Laboratoire de constructions hydrauliques, Ed. A. Schleiss, Lausanne, Suisse

Dubois, J., Boillat, J-L, Raboud, P-B, Costa, S., Pitteloud, P-Y, (2000). Einfluss der Wasserkraftanlagen auf die Hochwasser der Rhone im Kanton Wallis (Schweiz), Proc. Symposium Betrieb und Überwachung wasserbaulicher Anlagen, 19.-21. Oktober, Graz, Austria

García, J. (2006). Exploitation des prévisions météorologiques pour la prévision hydrologique opérationnelle du bassin versant du Rhône, rapport de Master non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

García, J., Jordan, F., Dubois, J., Boillat, J.-L. et Schleiss, A. (2007). Routing System II: Modélisation d'écoulements dans des systèmes hydrauliques, Communication du Laboratoire de Constructions Hydrauliques N°32, Ed. A. Schleiss, EPFL, Lausanne.

Guex, F. (2000). Modélisation du comportement hydrologique d'un bassin versant alpin en tenant compte des aménagements hydroélectriques. Application à la Viège en Valais, Séminaire interdisciplinaire HYDRAM-LCH, EPFL, Suisse

Hamdi, Y., Hingray, B. and Musy, A. (2003). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°1, volet B : Modélisation hydrologique, Rapport non publié, Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Hamdi, Y., Hingray, B. and Musy, A. (2004). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°2, volet B : Modélisation hydrologique, Rapport non publié, Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Hamdi, Y., Hingray, B. and Musy, A. (2005). Projet MINERVE, rapport intermédiaire N°3, volet B : Modélisation hydrologique, Rapport non publié, Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Hingray, B., Mezghani, A., Schaepli, B., Niggli, M., Faivre, G., Guex, F., Hamdi, Y. et Musy, A. (2006). Projet CONSECRU2 - Estimation des débits de crue du Rhône à la Porte du Scex et autres points amont caractéristiques, Rapport non publié, Laboratoire d'hydrologie et aménagements, EPFL, Lausanne.

Jordan, F., Boillat, J.-L., Dubois, J., and Schleiss, A. (2004). MINERVE, a tool for flood prediction and management of the Rhone

river catchment area, Proc., Risks in Design and Management of Rivers and Reservoirs, Technische Universität Dresden

Jordan, F., Boillat, J.-L., Dubois, J. et Schleiss, A. (2006). Prévision et gestion des crues par opérations préventives sur les retenues alpines, Proc., XXIIe Congrès des Grands Barrages, CIGB/ICOLD, Barcelone, pp. 497–510.

Jordan, F. (2007). Modèle de prévision et de gestion des crues - optimisation des opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation pour la réduction des débits de crue, rapport de thèse N°3711, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

LCH (2002). Modélisation Interdisciplinaire Numérique de l'Effet des Retenues Valaisannes à but Energétique - Projet MINERVE, Rapport non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

LCH (2003). Modèle de prévision et de gestion des crues, Rapport intermédiaire N°1, Rapport non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

LCH (2004). Modèle de prévision et de gestion des crues, Rapport intermédiaire N°2, Rapport non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

LCH (2005). Modèle de prévision et de gestion des crues, Rapport intermédiaire N°3, Rapport non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

LCH (2006). Modèle de prévision et de gestion des crues, Rapport intermédiaire N°4, Rapport non publié, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, EPFL, Lausanne.

Raboud, P.-B., Dubois, J., Boillat, J.-L., Costa, S., et Pitteloud, P.-Y. (2001). Projet MINERVE-Modélisation de la contribution des bassins d'accumulation lors des crues en Valais, Wasser Energie Luft, 11/12, 313-317

Schäfli, B. (2005). Quantification of Modelling Uncertainties in Climate Change Impact Studies on Water Resources : Application to a Glacier-fed Hydropower Production System in the Swiss Alps, rapport de thèse N°3225, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

Schäfli, B., Hingray, B., Niggli, M. et Musy, A. (2005). A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments, Hydrology and Earth System Sciences Discussions 2 : 73–117.

Shepard, D. (1968). A two-dimensionnal interpolation function for irregularly-spaced data, Proc., 23th Conference ACM, pp. 517–524.

- N° 26 2006 M. Andaroodi
Standardization of civil engineering works of small high-head
hydropower plants and development of an optimization tool
- N° 27 2006 Symposium érosion et protection des rives lacustres
Bases de dimensionnement des mesures de protection des rives
lacustres
- N° 28 2007 A. Vela Giró
Bank protection at the outer side of curved channels by an
undulated concrete wall
- N° 29 2007 F. Jordan
Modèle de prévision et de gestion des crues - Optimisation des
opérations des aménagements hydroélectriques à accumulation
pour la réduction des débits de crue
- N° 30 2007 P. Heller
Méthodologie pour la conception et la gestion des aménagements
hydrauliques à buts multiples
- N° 31 2007 P. Heller
Analyse qualitative des systèmes complexes à l'aide de la méthode
de Gomez & Probst
- N° 32 2007 J. García Hernández, F. Jordan, J. Dubois, J.-L. Boillat
Routing System II - Modélisation d'écoulements dans des systèmes
hydrauliques
- N° 33 2007 Symposium - Flussbauliche Massnahmen im Dienste des
Hochwasserschutzes, der Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft /
Mesures d'aménagement des cours d'eau pour la protection contre
les crues, l'environnement, la société et l'économie
- N° 34 2007 B. Rosier
Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed
morphology in a channel
- N° 35 2007 A. Amini
Contractile floating barriers for confinement and recuperation
of oil slicks
- N° 36 2008 T. Meile
Influence of macro-roughness of walls on steady and unsteady flow
in a channel
- N° 37 2008 S. A. Kantoush
Experimental study on the influence of the geometry of shallow
reservoirs on flow patterns and sedimentation by suspended
sediments
- N° 38 2008 F. Jordan, J. García Hernández, J. Dubois, J.-L. Boillat
Modélisation des intempéries de nature extrême du Rhône valaisan
et de leurs effets



ISSN 1661-1179

Prof. Dr A. Schleiss
Laboratoire de constructions hydrauliques - LCH
EPFL, Bât. GC, Station 18, CH-1015 Lausanne
<http://lchwww.epfl.ch>
e-mail: secretariat.lch@epfl.ch